

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Tadas MASIULIONIS

AUTOMATIZUOTA ORLAIVIO PILOTAVIMO VERTINIMO SISTEMA

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
TRANSPORTO INŽINERIJA (03T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2017

Disertacija rengta 2012–2017 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

prof. habil. dr. Jonas STANKŪNAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Nariai:

doc. dr. Domantas BRUČAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, matavimų inžinerija – 10T),

prof. habil. dr. Algimantas FEDARAVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

dr. Jolanta JANUTĖNIENĖ (Klaipėdos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

dr. Grzegorz KOPECKI (Žešuvo technologijos universitetas, Lenkija, transporto inžinerija – 03T).

Disertacija bus ginama viešame Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2017 m. birželio 19 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2017 m. gegužės 18 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius), Klaipėdos universiteto bibliotekoje (K. Donelaičio g. 3, LT-92144 Klaipėda), Aleksandro Stulginskio universiteto bibliotekoje (Studentų g. 11, LT-53361 Akademija, Kauno r.).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2017-032-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-026-6

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2017

© Tadas Masiulionis, 2017

tadas.masiulionis@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Tadas MASIULIONIS

AUTOMATED ASSESSMENT SYSTEM OF AIRCRAFT PILOTING

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
TRANSPORT ENGINEERING (03T)



Vilnius LEIDYKLA
TECHNIKA 2017

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2012–2017.

Supervisor

Prof. Dr Habil. Jonas STANKŪNAS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Transport Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Habil. Marijonas BOGDEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T).

Members:

Assoc. Prof. Dr Domantas BRUČAS (Vilnius Gediminas Technical University, Measurement Engineering – 10T),

Prof. Dr Habil. Algimantas FEDARAVIČIUS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – 03T),

Dr Jolanta JANUTĖNIENĖ (Klaipėda University, Transport Engineering – 03T),

Dr Grzegorz KOPECKI (Rzeszow University of Technology, Poland, Transport Engineering – 03T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Transport Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 19 June 2017**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intended defence of the dissertation was sent on 18 May 2017.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania), the Library of Klaipėda University (K. Donelaičio g. 3, LT-92144 Klaipėda, Lithuania), the Library of Aleksandras Stulginskis University (Studentų g. 11, LT-53361 Akademija, Kauno r., Lithuania).

Reziumė

Skrydžio sauga – vienas svarbiausių oro transporto sistemos uždavinių. Pagrindinis veiksnys užtikrinant skrydžių saugą – žmogiškasis faktorius. Vienas iš svarbiausių orlaivio piloto kvalifikacijos rodiklių – gebėjimas tiksliai pilotuoti oro erdvėje. Skrydžio trajektorijai fiksuoti ir jos atitikimui nurodytam maršrutui vertinti ir vertinimo rezultatams pateikti atliekant skrydžio analizę reikalinga automatizuota orlaivio pilotavimo vertinimo sistema.

Disertacijoje nagrinėjamos oro transporto skrydžių vertinimo problemos, taikant palydovinės navigacijos ir kompiuterines duomenų apdorojimo ir rodymo priemones, kurios padėtų pagerinti vertinimo objektyvumą. Pagrindiniai tyrimo objektai yra skrydžių duomenų vaizdavimas ir vertinimas. Jų detali analizė ir interpretacija leidžia sudaryti tinkamus skrydžio vertinimo modelius. Pagrindinis disertacijos tikslas – sukurti automatizuoto skrydžio tikslumo vertinimo metodiką, kuri, kartu su techninėmis priemonėmis, geba įrašyti orlaivio skrydžio trajektoriją ir nustatyti jos nuokrypius nuo nurodytos skrydžio tunelio ašies. Sukurtų priemonių taikymo sritis – orlaivių pilotų praktinių skrydžių tikslumo analizė bei jų vertinimas.

Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: kuriama automatizuota skrydžio tunelių modeliavimu grindžiama orlaivio pilotavimo tikslumo vertinimo sistemos veikimo metodika, sudaromi tunelių principu pagrįsti matematiniai/programiniai piloto skrydžio vertinimo modeliai bei analizuojami eksperimentinių skrydžių ir piloto skrydžio vertinimo tunelių matematinio modeliavimo rezultatai.

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai ir aštuoni priedai. Pirmajame skyriuje pateikiama vertinimo sistemos prielaidas, skrydžio vykdymo eigą, piloto skrydžio vertinimui keliamus reikalavimus bei piloto skrydžio vertinimo metodus nagrinėjančios literatūros analizė. Antrajame skyriuje aptariami sukurti programiniai piloto skrydžio vertinimo modeliai, leidžiantys, pagal pasirinktus parametrus, automatizuotai sudaryti skrydžio vertinimo tunelius, kurie padeda nustatyti orlaivio pilotų skrydžio nuokrypius nuo nurodytos trajektorijos. Trečiajame skyriuje nustatant tarpusavio atitikimą, veiksmingumą bei tikslumą yra analizuojami eksperimentinių skrydžių ir matematinio modeliavimo rezultatai.

Disertacijos tema paskelbti 7 straipsniai: vienas – straipsnių rinkinyje, įtrauktame į Thomson ISI sąrašą, vienas – konferencijos medžiagoje, referuotoje Thomson ISI duomenų bazėje, trys – recenzuojamose tarptautinių konferencijos medžiagose bei du – respublikinių konferencijų medžiagose. Disertacijos tema perskaityti 6 pranešimai Lietuvos bei kitų šalių konferencijose.

Abstract

Flight safety is one of the most important goals of the air transport system. A key factor for ensuring flight safety is the human factor. One of the most important indicators of an aircraft pilot qualification is the ability to accurately operate in the airspace. To record flight trajectory, to assess its compatibility with a pre-defined route, as well as to provide the results for flight analysis, an automated assessment system of aircraft piloting is necessary.

The dissertation investigates the issues of flight assessment, using satellite navigation, computer data processing and visualization means in order to improve the objectivity of assessment. The main research objects include flight data visualization and assessment. Their thorough analysis and interpretation will allow designing appropriate assessment models. The primary purpose of this dissertation is to design a methodology for automatic flight accuracy assessment, which, together with technical means, is able to record flight trajectory and determine its deviations from a defined flight tunnel axis. The area of application of the developed means is aircraft pilot flight accuracy analysis and assessment.

The dissertation approaches a few major tasks, such as: design of a methodology for the operation of an automatic aircraft piloting accuracy assessment system based on flight tunnel modelling, development of computerised tunnel-based flight assessment models, and analysis of experimental flight and designed model application results.

The dissertation consists of an introduction, three chapters, general conclusions, reference list as well as the list of the author publications on the dissertation topic, and annexes. In the first chapter, the literature review analysing the basis for a piloting assessment system, flight operation principles, requirements for pilot flight assessment, and pilot flight assessment methods is provided. In the second chapter, the designed tunnel based mathematical/computerised flight assessment models are described that allow, according to chosen criteria, the automatic development of flight assessment tunnels, which help to evaluate aircraft deviations from a defined trajectory. In the third chapter, the results of experimental flights and mathematical modelling of pilot flight assessment tunnels are analysed, in order to determine their compatibility, applicability, and effectiveness for assessing piloting accuracy.

Seven articles on the topic of the dissertation have been published: one published in a journal, included in the Thomson ISI register; one – in conference proceedings, referred to in the Thomson ISI data base; three – in reviewed international conference proceedings; and two – in reviewed national conference proceeding. Six presentations on the subject of the dissertation have been given in conferences in Lithuania and abroad.

Žymėjimai

Simboliai

d – atstumas;

h – aukštis;

v – greitis;

σ – paklaida.

Santrumpos

APS – apsisprendimų paramos sistema (angl. *DSS – Decision support system*);

ATZ – aerodromo eismo zona (angl. *Aerodrome traffic zone*);

BWR – Bedfordo piloto darbo krūvio vertinimas (angl. *Bedford workload rating*);

CAA – civilinė aviacijos administracija (angl. *Civil aviation administration*);

CTR – kontroliuojama zona (angl. *Control zone*);

DGNSS – GNSS patikslinančioji skirtuminė sistema (angl. *Differential GNSS*);

ECEF – geocentrinė stačiakampė plokštuminė koordinatų sistema (angl. *Earth-centered, Earth-fixed*);

EGNOS – Europos geostacionariosios navigacijos patikslinimo sistema (angl. *European geostationary navigation overlay service*);

ENU – vietinė stačiakampė Rytų, Šiaurės ir aukščio plokštuminė koordinatų sistema (angl. *Local cartesian East North Up coordinate system*);

SDS – skrydžio duomenų savirašis (angl. *FDR – Flight data recorder*);

STN – skrydžio techninis nuokrypis (angl. *FTE – Flight technical error*);

GLONASS – Rusijos visuotinė palydovinė navigacijos sistema (angl. *Russian global orbiting navigation satellite system*);

GNSS – visuotinė palydovinės navigacijos sistema (angl. *Global navigation satellite system*);

GPS – Jungtinių valstijų visuotinė padėties nustatymo sistema (angl. *Global positioning system*);

ST – skrydžio tunelis (angl. *HITS – Highway in the sky*);

ICAO – tarptautinė civilinės aviacijos organizacija (angl. *International civil aviation organization*);

PST – prietaisinės skrydžių taisyklės (angl. *IFR – Instrument flight rules*);

KTT – kilimo tępimo takas (angl. *RW – Runway*);

NSN – navigacijos sistemos nuokrypis (angl. *NSE – Navigation system error*);

TAN – trajektorijos apibrėžimo nuokrypis (angl. *PDE – Path definition error*);

PSN – pusinis skritulinis nuokrypis (angl. *CEP – Circular error probable*);

PSV – piloto sukelti virpesiai (angl. *PIO – Pilot-induced oscillations*);

RNP – reikalaujamas navigacinis tikslumas (angl. *Required navigation performance*);

SBAS – palydovinės navigacijos patikslinimo sistema (angl. *Satellite-based augmentation system*);

BSN – bendrasis sistemos nuokrypis (angl. *TSE – Total system error*);

VST – vizualių skrydžių taisyklės (angl. *VFR – Visual flight rules*);

WAAS – didelių sričių navigacijos patikslinimo sistema (angl. *Wide-area augmentation system*);

WGS-84 – pasaulinė geodezijos sistema 1984 (angl. *World geodetic system 1984*);

STN – skersinis trajektorijos nuokrypis (angl. *XTE – Cross-track error*);

ŽKS – žmogaus kompiuterio sąsaja (angl. *HCI – Human-computer interface*).

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas	1
Darbo aktualumas	2
Tyrimų objektas	2
Darbo tikslas	2
Darbo uždaviniai	2
Tyrimų metodika	3
Darbo mokslinis naujumas	3
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	3
Ginamieji teiginiai	3
Darbo rezultatų aprobavimas	4
Disertacijos struktūra	4
1. PILOTO SKRYDŽIO VERTINIMO METODŲ IR JŲ REIKALAVIMŲ ANALIZĖ	5
1.1. Piloto skrydžio vertinimo sistemos prielaidos	5
1.2. Skrydžių vykdymo modeliai	9
1.2.1. Piloto ir pilotavimo užduočių modeliai	13
1.2.2. Piloto įgūdžiai ir žinios	21
1.3. Piloto skrydžių vertinimui keliami reikalavimai	23

1.3.1. Skrydžio vykdymas	23
1.3.2. Pilotų skrydžiui keliami reikalavimai.....	27
1.4. Pilotų skrydžio vertinimo metodai	34
1.5. Modeliais pagrįstas vertinimas	40
1.6. Skrydžio duomenų gavimo būdai	54
1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas	61
2. ORLAIVIO PILOTŲ SKRYDŽIO TRAJEKTORIJŲ VERTINIMO MODELIŲ SUDARYMO METODIKA	63
2.1. Skrydžio duomenų analizės priemonės	63
2.2. Skrydžio maršruto duomenų analizės galimybės	66
2.3. Orlaivio pilotų skrydžio tuneliais grindžiamų trajektorijų vertinimo modelių sudarymas Matlab terpėje	71
2.3.1. Orlaivio pilotų skrydžio automatizuoto vertinimo koncepcija	72
2.3.2. Lėktuvo pilotų aerodromo rato trajektorijos tikslumo vertinimo programinis modelis.....	74
2.3.3. Lėktuvo pilotų laukimo zonų trajektorijų tikslumo vertinimo programiniai modeliai.....	83
2.3.4. Lėktuvo pilotų skrydžio maršruto trajektorijos tikslumo vertinimo programinis modelis.....	85
2.3.5. Sraigtasparnio pilotų slalomo skrydžio trajektorijų vertinimo modelis	93
2.4. Antrojo skyriaus išvados	95
3. ORLAIVIO PILOTŲ SKRYDŽIO TRAJEKTORIJŲ VERTINIMO MODELIO TAIKYMAS EKSPERIMENTINIUOSE SKRYDŽIUOSE	97
3.1. Eksperimentinių tyrimų metodika ir matavimo įrangos parinkimas	98
3.2. Modelio tyrimas lėktuvo aerodromo rato skrydyje	100
3.2.1. Lėktuvo pilotų skrydžio trajektorijų nukrypimo nuo aerodromo rato modelio vertinimas.....	103
3.2.2. Lėktuvo pilotų skrydžio aukštingumo vertinimas aerodromo ratuose	108
3.3. Modelio tyrimas lėktuvo skrydžio laukimo zonoje	111
3.4. Modelio tyrimas lėktuvo skrydyje maršrutu.....	114
3.5. Modelio tyrimas sraigtasparnio skrydyje slalomo trajektorija	121
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	127
BENDROSIOS IŠVADOS.....	129
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI	131

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	139
SUMMARY IN ENGLISH	141
PRIEDAI ¹	157
A priedas. Pilotų skrydžio vertinimo normatyvai.....	158
B priedas. Kuperio-Harperio orlaivio valdymo charakteristikų vertinimo skalė	161
C priedas. Aerodromo rato ir laukimo zonų eksperimentinių skrydžių rezultatai	162
D priedas. Skrydžio maršrutų eksperimentinių skrydžių rezultatai.....	222
E priedas. Palydovinių navigacijos imtuvų vietos nustatymo palyginimas.....	283
F priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija.....	289
G priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje.....	290
H priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos	292

¹ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Formulation of the problem.....	1
Relevance of the thesis	2
The object of the research.....	2
The aim of the thesis	2
The objectives of the thesis	2
The research methodology	3
Scientific novelty of the thesis	3
Practical value of the research findings	3
Defended statments	3
Approval of the research findings	4
The structure of the thesis.....	4
1. ANALYSIS OF PILOT FLIGHT ASSESSMENT METHODS AND REQUIREMENTS.....	5
1.1. Assumption of pilot flight assessment system.....	5
1.2. Models of flight operation	9
1.2.1. Models of pilot's control and piloting tasks	13
1.2.2. Pilot's skills and knowledge.....	21
1.3. Requirements for assessment of pilot flights.....	23

1.3.1. Operation of flight.....	23
1.3.2. Requirements for pilot flight	27
1.4. Pilot flight assessment methods.....	34
1.5. Model-based assessment methods	40
1.6. Methods of flight data acquisition	54
1.7. First chapter conclusions and formulation of dissertation objectives....	61
 2. METHODOLOGY FOR DEVELOPING THE ASSESSMENT	
MODELS OF AIRCRAFT FLIGHT TRAJECTORIES	63
2.1. Flight data analysis of enroute flight data	63
2.2. Possibilities of analysis of enroute flight data	66
2.3. Aircraft flight trajectories assessment models‘ development in Matlab.....	71
2.3.1. Concept of aircraft pilot automatic flight assessment	72
2.3.2. Computer model of airplane pilot traffic circuit trajectory precision assessment.....	74
2.3.3. Computer models of airplane pilot holding patterns trajectory precision assessment.....	83
2.3.4. Computer model of airplane en-route trajectory precision assessment	85
2.3.5. Computer model of helicopter pilot slalom flight trajectory assessment	93
2.4. Second chapter conclusions.....	95
 3. APPLICATION OF PILOT TRAJECTORY ASSESSMENT MODEL IN EXPERIMENTAL FLIGHTS	97
3.1. Measurement equipment used for experiments	98
3.2. Model experiment of airplane traffic circuit flight	100
3.2.1. Assessment of aircraft flight trajectory deviation from aerodrome traffic circuit model	105
3.2.2. Assessment of aircraft altitude variation in aerodrome traffic circuit	110
3.3. Model experiment of airplane holding pattern flight.....	111
3.4. Model experiment of airplane flight in en-route trajectory	114
3.5. Model experiment of helicopter flight in slalom trajectory	121
3.6. Third chapter conclusions.....	127
 GENERAL CONCLUSIONS.....	129
 REFERENCES	131

LIST SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR
ON THE TOPIC THE DISSERTATION..... 139

SUMMARY IN ENGLISH 141

ANNEXES² 157

Annex A. Assessment norms for pilot flight 158

Annex B. Cooper-Harper aircraft handling rating..... 161

Annex C. Experimental results of aerodrome traffic circuit..... 162

Annex D. Experimental results of en-route flights..... 222

Annex E. Comparison of satellite navigation receivers positioning..... 283

Annex F. Author’s declaration of academic integrity 289

Annex G. The agreements of co-authors to present publications
for the dissertation defence..... 290

Annex H. Copies of authors scientific publications on the subjects of
dissertation..... 292

² The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Ivadas

Problemos formulavimas

Pasaulyje nuolatos intensyvėjant orlaivių skrydžiams, iškilo būtinybė didinti orlaivių pralaidumą oro erdvėje. Oro erdvės didesniui pralaidumui pasiekti, Europoje ir JAV yra siaurinami oro keliai. Norint išlaikyti iki šiol turėtą skrydžio saugos lygį, buvo iškelti aukštesni skrydžio tikslumo reikalavimai orlaivyje naudojamoms radionavigacijos priemonėms. Šiuolaikinės orlaivio sistemos pasiekė aukštą skrydžio patikimumo lygį, gerokai pranokstantį piloto galimybes. Dauguma aviacijos incidentų ir katastrofų įvyksta dėl žmogaus kaltės. Staigus šiuolaikinių sistemų išsivystymas sukūrė netolygias sąlygas atitinkamam pilotų parengimui. Todėl vis dažniau aviacijos specialistų moksliniai tyrimai atsigręžia į orlaivio ir piloto sąsajas bei žmogiškąjį faktorių. Norint parengti aukštos kvalifikacijos pilotus, būtina kurti naują skrydžio tikslumo vertinimo metodiką ir jos automatizuotas priemones, kurios padėtų gerinti ir objektyviai patvirtintų pilotų pasiektą aukštą kvalifikacijos lygį. Kol kas nėra visus skrydžio etapus apimančios priemonės, kuri pagal nurodytus skrydžio parametrus tiksliai parodytų piloto padarytas neleistinai pavojingas skrydžio nuokrypius. Tą padėtų atlikti darbo autoriaus sukurta orlaivio piloto skrydžio tuneliais grindžiama automatizuoto vertinimo sistema.

Darbo aktualumas

Skrydžio sauga – vienas svarbiausių oro transporto sistemos uždavinių. Pagrindinis veiksnys užtikrinant skrydžių saugą – žmogiškasis faktorius. Vienas iš svarbiausių orlaivio piloto kvalifikacijos rodiklių – gebėjimas tiksliai pilotuoti oro erdvėje. Atliekant skrydžio analizę, skrydžio trajektorijai nustatyti ir jos atitikimui nurodytam maršrutui vertinti ir vertinimo rezultatams pateikti, reikalinga sukurti automatizuoto skrydžių vertinimo ir šių duomenų pateikimo metodiką. Pagal šią metodiką sukurtos priemonės aiškiai parodo būsimo orlaivio piloto turimus orlaivio valdymo, orientacijos bei oro uosto ir oro kelių žemėlapių naudojimo įgūdžius. Piloto automatizuoti skrydžio vertinimo tuneliai, sukurti ir patikrinti realiais skrydžiais, leidžia tiksliai ir objektyviai įvertinti piloto skrydžio nuokrypius nuo nurodytos skrydžio trajektorijos. Sukurta metodika ir priemonės supaprastina ir palengvina skrydžių instruktoriaus vertinimo darbą.

Tyrimų objektas

Darbo tyrimų objektas – mokomojo orlaivio skrydžio tikslumo automatizuoto vertinimo metodika ir priemonės, grindžiamos GNSS imtuvo skrydžio duomenų kompiuterinio apdorojimu ir vizualizavimu.

Darbo tikslas

Sukurti piloto skrydžio tikslumo vertinimo metodiką, kuri, kartu su techninėmis priemonėmis ir darbo autoriaus sukurtais algoritmais, geba automatizuotai sudaryti skrydžio tikslumo vertinimo tunelius ir vertinti piloto skrydžio tikslumą visuose skrydžio etapuose.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti darbe reikia spręsti šiuos uždavinius:

1. Atlikti šiuolaikinio mokslo pasiekimų analizę skrydžio tikslumo vertinimo srityje.
2. Pasirinkti darbo tikslui pasiekti reikalingus išmatuojamus ir apskaičiuojamus vertinimo kriterijus.
3. Sudaryti orlaivio piloto skrydžio automatizuoto vertinimo metodiką.
4. Teoriškai sukurtas metodines prielaidas patikrinti atlikus eksperimentinius skrydžius.

Tyrimų metodika

Darbo uždaviniais įgyvendinti naudojami:

- skrydžio tunelio matematinis modeliavimas, naudojant Matlab programinę įrangą;
- skrydžio parametrų įrašymas, naudojant GNSS imtuvą, ir skrydžio tunelio taikomo realiai orlaivio trajektorijai bei nuokrypių nuo nurodytos trajektorijos grafinis vaizdavimas;
- sukurtos automatizuotos orlaivio pilotavimo tikslumo vertinimo metodikos eksperimentinis tyrimas.

Darbo mokslinis naujumas

- Sukurta inovatyvi skrydžio tunelių modeliavimu bei šiuolaikinėmis programinėmis ir navigacijos priemonėmis grindžiama automatizuota mokomųjų skrydžių tikslumo vertinimo metodika.
- Metodika leidžia automatizuotai sudaryti skrydžio vertinimo tunelius bei tiksliai įvertinti piloto skrydžio trajektorijos tikslumą visuose mokomojo skrydžio etapuose ir sudaro sąlygas analizuoti nukrypimus nuo nurodytos skrydžio trajektorijos, pasitelkiant realių skrydžių trajektorijų kompiuterines vizualizavimo priemones.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Sukurta automatizuota orlaivio pilotavimo vertinimo sistema sudaro galimybes skaitmenine forma įvertinti ir parodyti orlaivio nukrypimus nuo nurodytos trajektorijos ir objektyviai, pagal vieningus kriterijus, įvertinti pilotavimo tikslumą. Sistema palengvina piloto instruktoriaus darbą, padeda gerinti mokymo ar tikrinamo piloto skrydžio tikslumo įgūdžius. Tai yra labai aktualu ne tik vykdant mokomuosius skrydžius, bet ir gerinant oro transporto aviacijos skrydžių saugą. Tolimesnis šios metodikos vystymas tampa ypač aktualus intensyvėjant aviacijos transporto skrydžiams ir keliant naujus reikalavimus jų tikslumui pagal bendro Europos dangaus ir kitas pasaulio oro transporto eismo intensyvumo vystymo programas.

Ginamieji teiginiai

1. Skrydžių tikslumo vertinimo metodikai sudaryti tinkamiausiu laikytinas matematinis modelis grindžiamas skrydžio tunelio konfigūracijų modeliavimu ir nuokrypių nuo nurodytos tunelio ašies vertinimu.

2. Tunelio matematinis modelis turi būti sudaromas iš atskiras skrydžio trajektorijos dalis modeliuojančių elementų su galimybe keisti skersinius tunelio matmenis ir nustatytų skrydžio trajektorijų parametrus priklausomai nuo pilotui skirtos užduoties sudėtingumo.
3. Metodikai įgyvendinti ir vertinimo vizualizavimui pagerinti, skrydžio duomenų informacija turi būti transformuojama iš aviacijoje naudojamų WGS-84 kampinių į vietinę ENU koordinatų sistemą.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema yra atspausdinti 7 moksliniai straipsniai: vienas – mokslo žurnale, įtrauktame į Thomson ISI sąrašą (Masiulionis 2017); trys – mokslo žurnaluose, vienas – recenzuojamoje tarptautinės konferencijos medžiagoje (Masiulionis, Stankūnas 2013), du – kitose tarptautinių ir respublikinių konferencijų medžiagose (Masiulionis, Stankūnas 2015; 2016).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti šešiose mokslinėse konferencijose Lietuvoje ir užsienyje:

- Tarptautinėje konferencijoje „*Research and Education in Aircraft Design*“, 2014 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Research and Education in Aircraft Design*“, 2016 m. Varšuva;
- Tarptautinėje konferencijoje „*Aviation*“, 2013 m. Vilniuje;
- Respublikinėje konferencijoje „*Aviacija*“, 2015 m. Vilniuje;
- Respublikinėje konferencijoje „*Aviacija*“, 2016 m. Vilniuje;
- Respublikinėje konferencijoje „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“ teminėje konferencijoje „*Aviacijos technologijos*“, 2014 m. Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, trys skyriai ir bendrosios išvados. Taip pat yra aštuoni priedai.

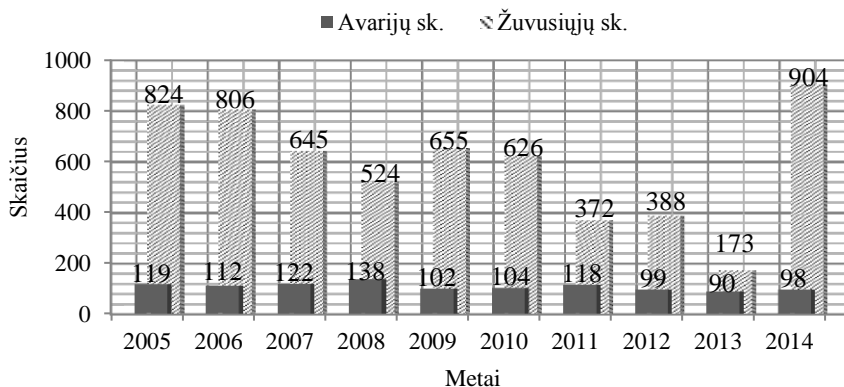
Darbo apimtis yra 157 puslapiai, neskaitant priedų, tekste panaudotos 19 numeruotų formulių, 102 paveikslai ir 7 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 122 literatūros šaltiniai.

Piloto skrydžio vertinimo metodų ir jų reikalavimų analizė

Skyriuje analizuojamos piloto skrydžio vertinimo sistemos prielaidos, orlaivio pilotų mokymo metodai, skrydžiams taikomi piloto skrydžio tikslumo reikalavimai, matavimo parametrai ir įranga. Šios skyriaus medžiaga autoriaus paskelbta (Masiulionis 2011, 2017).

1.1. Piloto skrydžio vertinimo sistemos prielaidos

Dabartiniu metu komerciniai skrydžiai yra viena iš patikimiausių transporto rūšių (EASA 2013). Sukūrus modernias technologijas, nelaimingų atsitikimų dėl mechaninių gedimų sumažėjo nuo 80 iki 20 % (Du 2009). Taip pat pagal ICAO saugumo ataskaitą (1.1 pav.) yra matomas bendras orlaivių avarijų kasmetinis mažėjimas ir, nepaisant pastarųjų metų politinių bei neišaiškintų didžiųjų orlaivių įvykių, pastebimas akivaizdus žuvusiųjų sumažėjimas (ICAO 2015). Deja, tarp pagrindinių priežasčių, žmogiškasis veiksnys (1.1 lentelė) vis dar užima aukštą vietą dėl prasto skrydžio našumo ir avarijų (Cai 2014). Daugiau nei pusė jų (53 %) įvyksta dėl to, kad orlaivio įgula nesilaiko galiojančių procedūrų (Savičienė 2009).



1.1 pav. Orlaivių avarijų ir žuvusiųjų skaičius pasaulyje (EASA 2016)

Fig. 1.1. The number of aircraft accidents and deaths in the World (EASA 2016)

Long (2001) teigia, kad 2000 metais JAV orlaivių kompanijos jau pervežė daugiau kaip 670 mln. keleivių, o 2015 m. – 798 mln. keleivių. Pabrėžiama, kad keleivių padaugėjo tiek, jog komercinės oro transporto paslaugos tapo tokios svarbios, kad bet kokie didesni paslaugos sutrikimai sukelia visuomenės protestus (Williams 2005). Nors dabartinės aviacijos sistemos gerai atlieka savo paskirtį, jos palengva pradeda siekti savo galimybių ribas.

1.1 lentelė. Orlaivių avarijų ir keleivių žūčių priežastys 1990–2006 m. (Oster 2010)

Table 1.1. Aircraft accidents and passenger fatalities by cause in the period 1990–2006 (Oster 2010)

Avarijų priežastys	Keleivių žūtys		Avarijos		Žuvusiųjų keleivių dalis, %
	Skaičius	%	Skaičius	%	
Piloto klaidos	5928	34	278	40	65
Įrangos gedimai	4694	27	158	23	72
Kitos priežastys	2150	12	134	19	93
Meteorologinės sąlygos	1751	10	71	10	71
Terorizmas, nusikaltimai	1308	7	30	4	62
Susidūrimai	907	5	14	2	100
Skrydžių valdymas	443	3	9	1	87
Antžeminio/salono personalo klaidos	303	2	4	1	92
Turbulencija	2	0	2	0	0,3



1.2 pav. Flightradar sistemos rodomi skrydžio srautai pasaulyje 2016 m.

Fig. 1.2. Flightradar represented flight flows in the World in 2016

Didėjant sistemų reikalavimams ir išaugus skrydžių skaičiui, skrydžių valdymo ir navigacijos sistemos gali pasiekti aklavietę per artimiausius 10–15 metų (Williams 2005). Nuolat didėjant oro eismui, oro erdvė tampa tankesnė (1.2 pav.). Išlaikant esamą saugos lygį, oro erdvės valdymas susiduria su dideliu iššūkiu – susidoroti su eismo padidėjimu. Šiam tikslui pasiekti reikės geriau ir tiksliau planuoti skrydžius (Hrastovec 2014).

Sparčiai vystantis pasauliniam oro transportui ir didėjant spūstims ribotuose oro erdvės ištekluose, sudėtinguose oro eismo srautuose kartu su pažangiu skrydžio planavimu vis dar naudojama oro eismo valdymo sistema neišnaudoja šiuolaikinių technologijų galimybių. Skrydžio plane nėra tikslaus orlaivio oro kelių atskyrimo, kuris nesukeltų oro eismo spūsčių ir nesumažintų oro erdvės saugos. Oro eismo valdymo automatizavimo sistema, paremta skrydžio planu, negali įvertinti skrydžio trajektorijos aukščio profilio, dėl kurio susidaro prastas oro kelių atskyrimas. Oro eismo valdymo darbas vis dar orientuotas į oro kelių atskyrimą individualiam orlaiviui. Dėl to yra sudėtinga padidinti strateginį valdymą eismo sraute (Tang 2012). Todėl buvo galima numanyti ir dabar iš dalies jau yra matomi pokyčiai oro navigacijoje, kuri stengiasi patenkinti didėjančius skrydžių eismo reikalavimus.

Europa ir JAV įgyvendino naujos kartos oro eismo valdymo sistemą, vadinamą Bendro Europos dangaus ATM tyrimą (angl. *SESAR – Single European sky ATM research*) ir, atitinkamai, naujos kartos oro transporto sistemą (angl. *NGATS – Next generation (NextGen) air transport system*) (Swenson 2006; Dlugi 2007), kurių tikslas – pagerinti oro eismo valdymo aptarnavimo kokybę. Viena iš pagrindinių naudojamų technologijų yra 4D

trajektorijų naudojimas, kuris keičia esamus skrydžio planus ir oro eismo valdymą, įtraukdamas juos į naują didelio tankio oro erdvės mechanizmą (Dlugi 2007). 4D trajektorijos tiksliai apibūdina vietą (platuma, ilguma ir aukštis) ir orlaivio laiką, todėl tokių 4D trajektorijų principu valdomi orlaivio atvykimo laiko langai oro keliuose (Warren 2000). Apskritai, 4D trajektorijų naudojimas yra veiksminga priemonė didelio tankio ir orlaivių artumo skirstymo erdvės valdymui, taip pat gali gerokai sumažinti orlaivių trajektorijos neapibrėžtumą ir pagerinti saugą, oro erdvės bei oro uostų veikimo naudingumą (Yi 2007; Tang 2012).

Be to, labai sparčiai pradėjo vystytis elektroninės navigacijos sistemos, kai savo paslaugas visuomenei pradėjo teikti visuotinės palydovinės navigacijos sistemos (angl. *GNSS – Global navigation satellite system*). Vienos iš pirmųjų visiškai veikiančių pasirodė JAV GPS (angl. *Global positioning system*), o kiek vėliau ir Rusijoje sukurta GLONASS (angl. *Global orbiting navigation satellite system*) sistema. Kitos GNSS sistemos atsilieka nuo plėtojimo plano ir dar tebėra kuriamos, tačiau žada geras ateities perspektyvas tiek visuomenei, tiek aviacijai. Europos kosmoso agentūros (angl. *ESA – Europe space agency*) plėtojama palydovinė navigacinė sistema GALILEO ir Kinijos COMPASS turėtų visiškai veikti 2020 metais. O Indijos IRNSS (angl. *Indian regional navigation satellite system*) palydovinė navigacijos sistema dar tik pradeda savo palydovų paleidimo misijas, kurių pabaiga planuojama po 10 metų.

Esant tokiai navigacinių sistemų pažangai, skrydžių vadovai ir orlaivių pilotai taip pat neatsilieka. Jiems kuriamos įvairios skrydžio vaizdavimo ir paramos sistemos (Savičienė 2012; Ober 1998). Treniruotėms kuriami realaus skrydžio treniruokliai ir jiems keliami specifiniai reikalavimai (Blackwood 2005). 2014 metais atliktoje stažuotėje Prancūzijos ONERA (Salone de Provence) aeronautikos laboratorijoje susipažinta su mokslininkų ir doktorantų veikla, kurie aktyviai tiria sraigtasparnio pilotus taikydami Fitso dėsny ir naudojant mokslinį skrydžio treniruoklį, optines kameras rankos judesiams fiksuoti, bei elektroencefalografijos (angl. *EEG – Electroencephalography*) tyrimo metodus analizuojant pilotų smegenų sričių reakciją į įvairius išorinius orlaivyje esančius dirgiklius (pvz., garsinius signalus).

Kylantys bepiločių orlaivių integracijos poreikiai ir didėjantys skrydžio tikslumo reikalavimai skatina griežtinti pilotų mokymo reikalavimus, kad studentai gebėtų tiksliau skraidyti pagal nurodytas skrydžio trajektorijas. Tam, kad tinkamai įvertintume studento skrydžio tikslumą, reikalingos tobulesnės priemonės, gebančios susidoroti su aktualiomis šioje srityje kylančiomis problemomis.

1.2. Skrydžių vykdymo modeliai

Skrydžio metu sąveikauja dvi visiškai skirtingos pusės: žmogus ir orlaivis (kompiuteriu valdoma mašina), taigi sėkmingas ryšio tarp šių dviejų dalių palaikymas ir apibrėžia efektyvų skrydžio vykdymą. Nagrinėjant žmogaus ir kompiuterio sąsają (ŽKS), visi duomenys skirstomi į dvi sritis: informacijos apie žmogų surinkimą (konkrečios tikslinės grupės vartojimo įpročiai ir poreikiai) ir informacijos naudojimą prieš jį patį (atitinkama informacija pateikiama reikiamoje vietoje, tikslingai, pagal jau sudarytą tikslinį vartotojo (žmogaus) apibūdinimą) (Švedaitė 2012). Iš surinktos informacijos sudaryti modeliai padeda suprasti žmonių įpročius, pasirinkimus, mąstyseną, elgseną ir suteikia papildomų duomenų, kuriais remiantis galima priimti tam tikrus sprendimus, susijusius su žmogaus ir mašinos sąveika. Išskiriami du vertinimo metodai, kurie nagrinėja, kaip pasireiškia žmogaus ir mašinos, šiuo atveju piloto ir orlaivio, sąveika: psichofizinis ir inžinerinis.

Psichofiziniu vertinimo metodu nagrinėjamas sudėtingas ryšys su optiniais arba vaizdiniais dirgikliais, naudojantis žmogaus gebėjimu suvokti judėjimą erdvėje ir jautrumu tokiems dirgikliams. Vaizduojama scena yra optinio masyvo segmentas, perteikiantis trimatį pasaulio vaizdą dvimačiu vaizdu stebimame taške. Ši scena gali būti charakterizuojama įvairiais intensyvumo ar ryškumo lygiais, kurie informuoja stebėtoją apie jo orientaciją ir judėjimą (pvz., Phatak (1982) aprašė ribas, kurios galimos vizualių skrydžių užduotyje). Pilotai gali ne tik nuovokiai nustatyti ir išskirti pagrindines optines ypatybes, tokias kaip taškai ir kraštai, bet taip pat gali tiesiogiai išskirti ir valdyti didesnės svarbos ypatybes, tokias kaip optinės tekstūros dydis, optinės formos, erdvėlaikiniai modeliai. Pasak Gibsono (1966), regos masyvas susideda iš svarbių savybių ir ribų, kurios tiesiogiai valdomos skrydžio metu. Be to, šios ribos gali būti susijusios su orlaivio būsenos kintamaisiais tik sudėtingais ir netiesioginiais būdais (Johnson 1990).

Deja, neaišku, kaip tiksliai šis metodas atitinka rankinio valdomo skrydžio principus, kadangi psichologai dažniausiai palieka valdymo suvokimo tyrimus inžinerijos bendruomenei. Be to, psichofizinis metodas yra priešingas prielaidai, kuria remiasi inžineriniai metodai, kad pilotai skraido pagal orlaivio padėties ir aplinkos veiksnius, vaizduojamus ekranuose, bet ne pagal realius pojūčius. Vietoj to inžineriniuose metoduose teigiama, kad žmonės yra priklausomi nuo optinių kintamųjų, kad gautų šių būsenų kintamųjų įverčius, kurie savo ruožtu naudojami valdymui. Taigi, remiantis inžineriniu metodu, sukuriama valdymo dėsniai, neparodantys valdymo veiklos, kuri tiesiogiai vadovaujasi optiniais kintamaisiais ar modeliais (Johnson 1990).

Inžineriniai tyrimo metodai, analizuojantys vizualiai valdomus skrydžius, išskiria dvi svarbias kryptis. Viena iš jų yra klasikinė valdymo metodologija,

apibūdinanti paprastą įvedimo ir išvedimo valdymo sistemų elgseną. Ja remiantis pasikliaujama minimaliomis psichologinėmis prielaidomis, ji yra geriausiai parodoma klasikine įvedimo ir išvedimo kvaziliniškos funkcija arba modeliu (McRuer 1967). Kita kryptis yra esminių teorinių prielaidų derinimas su moderniais valdymo teorijos metodais kuriant modelius. Ši kryptis išreikšta optimaliu valdymo modeliu, kuris paremtas tiesine-kvadratine-Gauso (TKG) (angl. *LQG – Linear-quadratic-Gaussian*) optimalaus valdymo formuluote (Kleinman 1971). Naudojant aprašomosios funkcijos būdą egzistuoja žmogaus valdymo nurašinėjimo problema, o dėmesys sutelkiamas į įvedimo ir išvedimo matavimo ir vaizdavimo sąryšius. Tuo pat metu, optimalaus modelio formulavimas apima psichologinį modelį, kuris skaido žmogaus valdymo strategiją į du pakopinius procesus, kuriuose naudojami neapdoroti įvesties kintamieji (Johnson 1990).

Johnson (1990), aprašęs optimalų valdymo modelį, teigia, kad žmonės pirmiausia apdoroja neapdorotas suvokimo įvestis naudodamiesi Kalmano filtru, kuris pateikia transporto priemonių ir trikdžių būsenų įvertinimus. Šiuo modeliu taip pat parodoma, kad žmonės turi vidinį transporto priemonių ir trikdžių įvesties modelį, kuris gali būti išreikštas matematine forma bendroje žemės inercijos plotmėje (angl. *Earth-fixed inertial frame of reference*). Modelis taip pat parodo, kad žmonės veikia remdamiesi skaičiavimais, naudodamiesi optimaliu tiesiniu kvadratinio valdikliu. Taikant šį modelį vizualioms valdymo užduotims, kaip įvestys naudojamos vaizdinės savybės ir optiniai kintamieji, bet šie tuomet perleidžiami per Kalmano filtrą, siekiant apskaičiuoti transporto priemonių ir trikdžių būsenas. Valdomos būtent šios apskaičiuotos būsenos, o ne optiniai kintamieji. Tarkime, kad tai atliekama tiesiniu visos būsenos grįžtamojo ryšio valdikliu, kuris sukurtas kvadratinę kaštų funkciją sumažinti (angl. *Quadratic cost function*).

Taigi, šiuolaikinė valdymo teorija ir psichofizinis metodas pateikia priešingus informacijos, kurią žmonės naudoja skrydžiams valdyti, modelius. Remiantis optimalaus valdymo modeliu teigiama, kad žmonės taiko neoptinius informacijos gavimo principus. Todėl valdymo pagrindą sudaro neapdorotų optinių kintamųjų konvertavimas į kitą naudingesnę formą, t. y., transporto priemonės padėties kintamieji yra apibrėžiami inercinės sistemos teikiamais informacijos duomenimis. Remiantis psichofiziniu metodu teigiama, kad konvertavimas nėra reikalingas, nes žmogus veikia optiškai apibrėžtoje plotmėje (remiasi optiniais kintamaisiais). Dėl to valdymas grindžiamas gebėjimu pasirinkti tinkamiausius optinius kintamuosius tam tikroms valdymo užduotims atlikti, ir konvertavimas į kitokią formą yra nereikalingas (Johnson 1990).

Suvokiamoje aplinkoje pilotas gali būti valdyti orlaivį dviem būdais: rankiniu valdymu arba automatiškai. Abu turi savo privalumų ir trūkumų, reikalauja skirtingų piloto taikomų strategijų ir informacijos apdorojimo, kitokių

reikiamų įgūdžių. Orlaivio rankinio valdymo metu turi būti laikomasi keturių pagrindinių informacijos apdorojimo etapų: suvokimo, atpažinimo, apdorojimo bei atsako vykdymo (Childs, Spears 1986). Skrydžio mokykloje pilotai mokosi ir intensyviai treniruojasi atlikti šiuos veiksmus prieš susipažindami su automatiniu valdymu, kuris tuomet perima pilotų orlaivio valdymo užduotis (Childs, Spears 1986; JAR 2006). Nuo šio momento pilotai, nuolat naudojantys automatinio valdymo sistemas, praranda turėtus rankinius pilotavimo įgūdžius (Balfe 2012; Billings 1991; Endsley, Kiris 1995) dėl automatikos perimtų užduočių, kurias pirmiau vykdė pilotas, vykdymo atsakomybės (Haslbeck 2014; Parasuraman, Riley 1997). Tokį atvirkštinį ryšį pirmiausia sukelia automatizavimas, kuris pakeičia aktyvias skrydžio užduotis pasyviomis stebėjimo užduotimis, sumažėja piloto budrumas (Sarter, Woods 1995; Endsley 1999). Anksčiau gamintos pilotų kabinos su vaizduokliais (vėlyvaisiais 8-ojo dešimtmečio metais), skrydžio valdymo sistemomis (angl. *FMS – Flight management systems*) ir valdymo laidais (angl. *FBW – Fly by wire*) (vėlyvaisiais 9-ojo dešimtmečio metais) komercinėje aviacijoje buvo reikšmingi automatizavimo etapai (Haslbeck 2014).

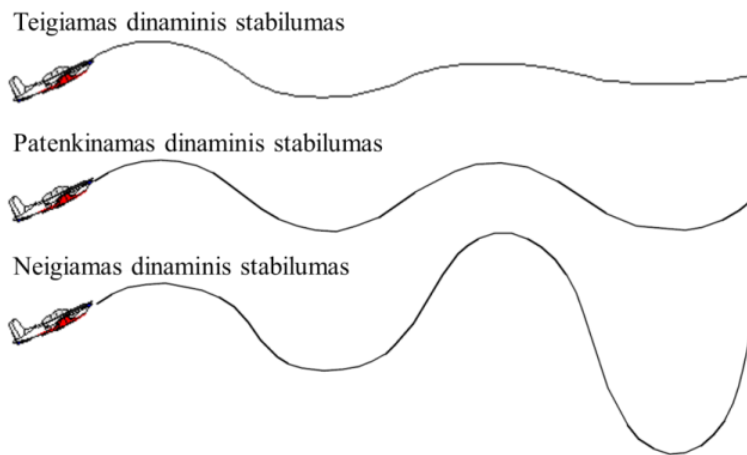
Billings (1991) taip pat analizavo šiuos pokyčius informacijos, valdymo ir automatinių valdymo sistemų požiūriu. Automatinės sistemos padeda pilotui sudėtingose situacijose, kai jis nesugeba veikti efektyviai dėl didelio darbo krūvio, nuovargio ar atsiradus netikslumams.

Veillette (1995) perėjimą nuo įprastinių piloto kabinų prie automatizuotų įvertino atlikdamas tyrimą su skrydžio treniruokliu. Atlikdamas eksperimentą su oro linijų pilotais, jis tyrė rankinio valdymo skrydžio našumą su įvairaus lygio automatinėmis sistemomis. Šio tyrimo rezultatai parodė reikšmingus rankinio valdymo skrydžio našumo skirtumus dviejose grupėse: pilotai, pripratę prie automatinių sistemų, gerokai daugiau nukrypavo nuo suplanuotos skrydžio trajektorijos. Esant automatinių sistemų poveikiui blogėja rankinio valdymo įgūdžiai. Gillen (2008) pristatė naujesnius tyrimus, susijusius su rankinio valdymo skrydžio našumu. Jo palyginimas parodė, kad pilotai save vertino geriau, nei sugebėjo parodyti atliekant eksperimentą su skrydžio treniruokliu. Vadinasi, pilotai šališkai vertino pasitikėjimą savo įgūdžiais (Haslbeck 2014).

Ebbatson (2009) vykdė didelio masto rankinio pilotavimo skrydžio našumo duomenų analizę, tirdamas, kaip koreliuoja rankinio pilotavimo ir praktinių skrydžių įgūdžiai, o ne bendra skrydžio patirtis. Skrydžių praktika, įskaitant rankinį pilotavimą, truko keletą savaičių prieš eksperimentą, turėjo daugiau įtakos matavimams, negu skrydžio valandos, sukauptos per visą piloto karjerą. Galiausiai, Ebbatson pasiūlė pakartoti savo eksperimentą su tolimųjų skrydžių pilotų grupe. Rezultatai parodė dar didesnę skirtumą tarp rankinio pilotavimo našumo ir praktinių skrydžių (Haslbeck 2014).

Nors šiais tyrimais išsamiai išanalizuotas tyrimo objektas, deja, nepateiktas išsamus vaizdas apie pilotų, turinčių mažai skrydžių praktikos ir nedaug galimybių mokytis skraidyti, tokių kaip tolimųjų skrydžių pilotai, našumą. Bandant užpildyti šią spragą, Haslbeck (2014) atliko tyrimą su tolimųjų skrydžių pilotais. Įrodyta, kad tiriamasis orlaivio kapitonas, turintis mažiau praktikos ir turėjęs mažiau mokymų, skrydyje labiau nukrypsta nuo idealios trajektorijos, negu didesnę skrydžių praktiką turintis jo kolega antrasis pilotas.

Vienas iš kriterijų, padedančių vertinti piloto gebėjimus skrydžio metu, yra reakcijos, reikalingos reikiamam veiksmui atlikti, laikas. Tuo pat metu laiko vėlinimas yra laikomas vienu iš didžiausių veiksnių, mažinančių skrydžio našumą. Laiko vėlinimas – tai laikas, kurio metu piloto atsakas į reikiamą veiksmą dėl vienų ar kitų priežasčių yra užtęsiamas. Atsižvelgus į situacijas, kuriose laiko vėlinimas yra didelis, orlaivyje atsiranda piloto sukeliamų virpesių (PSV) tendencija (Berry 1982) – pilotas nenutrūkstamai tikslina nurodytos trajektorijos centrą, todėl atsiranda valdymo svyravimai (1.3 pav.). Dauguma tyrimų pabrėžia laiko vėlinimą mechaninėje valdymo sistemoje, tačiau retai įvertinamas žmogaus sukiamas vėlinimas, kuris skrydžiui yra itin svarbus.



1.3 pav. Teigiamas, patenkinamas ir neigiamas vertikalus orlaivio dinaminis stabilumas
(Strunk, Knight 2006)

Fig. 1.3. Positive, neutral, and negative aircraft dynamic stability
(Strunk, Knight 2006)

Hiko dėsnis (angl. *Hick-Hyman law*) gali būti pritaikomas siekiant įvertinti potencialų vėlinimą sistemoje. Jis teigia, kad laikas, reikalingas sprendimui priimti, ilgėja didėjant galimų pasirinkimų skaičiui, pvz., kai lėktuvo pilotas turi reaguoti į kokią nors įvykį, tarkime, nuspausti pavojaus mygtuką. Hiko dėsnis teigia, kad kuo daugiau alternatyvių mygtukų bus, tuo ilgiau pilotas užtruks prieš

nuspausdamas reikiamą mygtuką. Kuo daugiau sprendimų reikia įvykdyti, tuo ilgesnis vėlinimas prieš atliekant konkretų veiksmą. Kompleksinis uždavinys su trimis variantais, reikalaujantis perskaityti sakinius ir intensyviai susikoncentruoti, paprastai gali būti sprendžiamas ilgiau nei paprastas postūmio ir atsako uždavinys su šešiais variantais. Taigi, kuo sudėtingesnės taisyklės ir procedūros, kurias reikia vykdyti, tuo didesnis vėlinimas ir, galiausiai, mažesnis darbo našumas. Hiko dėsnis yra labiausiai taikytinas paprastoms užduotims, kuriose yra unikalūs atsakymai į kiekvieną postūmį, spręsti. Pavyzdžiui, jei nutinka įvykis A, tada spauskite mygtuką 1, jei – įvykis B, spauskite mygtuką 2. Hiko dėsnis vis mažiau tinkamas, kai didėja uždavinio sudėtingumas (Švedaitė 2012; Schelkes 2003).

Tyrimų metu gaunami rezultatai, susiję su skrydžio našumu, yra kokybiniai. Kiekybiniai rezultatai vis dar nėra itin gerai įsitvirtinę vertinant skrydžius. Naujausiuose darbuose (Hess 2009; Hess 2012; Nieuwenhuizen 2008; Foyle 2010; Yang 2014) pateikiami pagrįsti pilotų modeliai su integruotais keliais žmogaus veiksniais, kurie sudaro galimybes atlikti kiekybinius vertinimus. Tačiau daugumai šių darbų trūksta eksperimentinių įrodymų, kuriais būtų galima labiau pasitikėti.

Cai (2014) nagrinėjo piloto laiko vėlinimą žmogaus ir mašinos valdymo sistemose, ieškodamas poveikio skrydžio našumui. Jis atliko modeliavimą su žmogaus ciklo piloto modeliu (Yang 2014) remdamasis Monte Karlo metodu, plačia kompiuterinių algoritmų klase, kuri grindžiama pakartotine duomenų atranka skaitiniams rezultatams gauti (Rubinstein, Kroese 2011). Skrydžio našumas yra kiekybinis su vadinamuoju skrydžio valdymo tikslumo kriterijumi, kuris daro įtaką išankstinėms išvadoms. Remdamasis šiuo metodu Cai atliko kelis eksperimentus su pilotais. Be to, piloto laiko vėlinimo saugumo atsarga buvo padidinta naudojant atgalinį žingsniavimą (angl. *Back-stepping*) su apibrėžtomis skrydžio našumo ribomis. Gauti rezultatai rodo, kad skrydžio vykdymas neigiamai koreliuoja su piloto veiksmų vėlinimu.

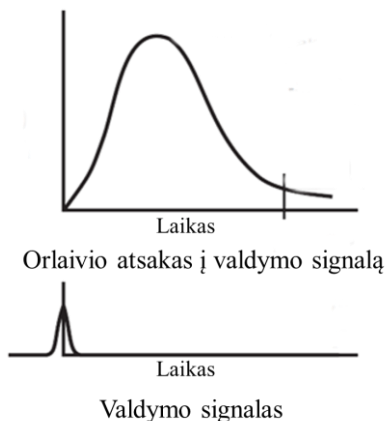
Kaip ir įprasta žmogaus ir mašinos sistema, skrydžio valdymo sistema taip pat parodo ryšį tarp mechaninės sistemos valdymo ir žmogaus veiksmų sistemos valdymo. Šaltiniuose, tiriančiuose šią sąveiką, buvo parengti modeliai, tiriantys piloto laiko vėlinimo poveikį skrydžio našumui, naudojant pagrįstą piloto modelį su pritaikytais kiekybiniais žmogaus veiksniais. Modeliavimas ir eksperimentai buvo atliekami pagal nurodytą skrydžio trajektoriją. Kiekybinis vertinimo metodas išplėstas, kad suteiktų objektyvų skrydžio našumo vertinimą.

1.2.1. Piloto ir pilotavimo užduočių modeliai

Norint įvertinti žmogaus elgesį, reikia pradėti nuo labai supaprastintų elgesio modelių. Aprašyti žmogaus elgesį tam tikra matematine funkcija, kurią būtų

galima toliau naudoti konkrečiai analizei, yra labai sunki procedūra. Valdydamas orlaivį, pilotas atlieka įvairias užduotis. Orlaivio kurso valdymas yra vienos iš atliekamų užduočių pavyzdys. Siekiant pateikti tokio veiksmo charakteristikų analizę ir atitinkamus žmogaus ir piloto įgūdžių vertinimus, valdant orlaivio kursą, galima vyksmą atkartoti naudojant Matlab-Simulink imitavimo aplinką (Jalovecky 2009). Tai tik vienas iš paprastesnių galimybių pavyzdžių.

Atlikta keletas eksperimentų, nustatančių piloto perdavimo funkciją paprastose prietaisinėse grįžtamojo ryšio valdymo užduotyse. Pavyzdžiui, paprastas piloto modelis turi stiprinimą su laiko vėlinimu, kuris paprastai svyruoja nuo 0,15 iki 0,4 s. Prie minėto piloto valdymo signalo reikėtų papildomai pridėti orlaivio valdymo sistemų vėlinimo laiką (1.4 pav.) (AMCOM 2000).



1.4 pav. Pavaros veikimo atsakas į valdymo signalą (AMCOM 2000)

Fig. 1.4. Actuator pulse response (AMCOM 2000)

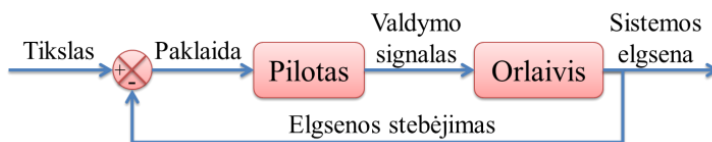
Nuo 1950 metų aeronautikos inžinerijai buvo pasiūlyta keletas matematinių modelių, kuriais atkartojamas piloto gebėjimas valdyti orlaivį. Dauguma šių funkcinų modelių, kurie paprastai išreiškia perdavimo funkciją, remiasi teoriniais valdymo principais, tokiais kaip šaknų hodografas ir Bode diagramos. Šie principai pirmiausia grindžiami duomenimis, gautais iš anketų, kurias užpildė pilotai, arba iš skrydžio bandymo prietaisų. Visų pirma, šie modeliai priklauso pirmoms dviems pagrindinėms modeliavimo idėjomis, kurios koncentruotos į tam tikros užduoties vykdymą taikant piloto perdavimo funkciją, kad būtų valdomi tam tikri orlaivio padėties aspektai. Tokie modeliai apdoroja piloto valdymo veiksmus kaip valdymo lygčių sistemą orlaivio funkcijos valdymo cikle. Nors šie valdymo modeliai yra puikūs inžineriniai pasiekimai, jie pirmiausia orientuoti į orlaivio autopiloto sistemos valdymą ir nesuteikia galimybių suprasti piloto elgesio. Antrosios grupės tyrimai, kurie ir toliau bus

nagrinėjami, artimesni piloto modeliais grindžiamai valdymo teorijai (Kaygusuz 2015).

Pirmaisiais piloto veiksmų valdymo teorijos modeliais siekta nustatyti valdymo parametrus vertikalaus kilimo ir tūpimo (angl. *VTOL – Vertical take-off and landing*) orlaiviams, kurie buvo JAV oro pajėgų skrydžio dinamikos laboratorijoje (angl. *AFFDL – US air force flight dynamics laboratory*) (Blakelock 1991). Šio tyrimo tikslas – nustatyti VTOL parametrus kuriamiems naujiems orlaiviams, koncentruojantis į mašinos ir žmogaus sąveikos charakteristikas, gautas iš įprastų orlaivių. Kol VTOL orlaiviai dar nebuvo sukurti, AFFDL neturėjo jokių galimybių naudotis realiais skrydžio duomenimis, todėl mokslininkai nusprendė naudoti sumodeliuotą aplinką, kad nustatytų piloto veiksmų našumo parametrus naudojantis Kuperio-Harperio vertinimo skale (B priedas). Naudodamasis šia skale, pilotas atsakinėja į pateiktus klausimus pagal algoritmą ir pagal pasirinktus atsakymus yra nukreipiamas į atitinkamo orlaivio valdomumo lygio aprašymą. Jei Kuperio-Harperio skalės aprašymas atitinka lygiavertį orlaivio valdomumo lygį, ties tuo lygiu ir galima sustoti. Skalę sudaro dešimt valdomumo lygių, iš kurių 1 reiškia geriausią orlaivio valdomumą, o 10 – blogiausią (Kaygusuz 2015). Galiausiai šio darbo rezultatu 1960 m. tapo pirma piloto valdymo teorija, vadinama bendruoju piloto modeliu (Jonhnsen, Pritchett, Kaygusuz 2015).

Remiantis piloto modeliais, kuriamos įvairios valdymo teorijos, siekiančios įminti žmogaus elgesį ir aprašyti orlaivio valdymo specifiką. „Kryžminis modelis“ yra viena iš dviejų gerai žinomų valdymo teorijų, paremtų piloto modeliais. Šis modelis pavadintas pagal skersinį dažnį, kai Bode diagramų fazės kampas lygus -180° arba $-\pi$ (Blakelock 1991). „Kryžminių modelių“ iliustruojamas paprastas piloto ir orlaivio valdymo ciklas, panašus į pateiktą 1.5 paveiksle.

McRuer ir Jex (1967) pateikia „kryžminį modelį“, parašytą dažnių srityje su parametrais $j\omega$, Blakelock (1991) pateikia tokį patį modelį Laplaso srityje su kintamuoju s (McRuer 1967).

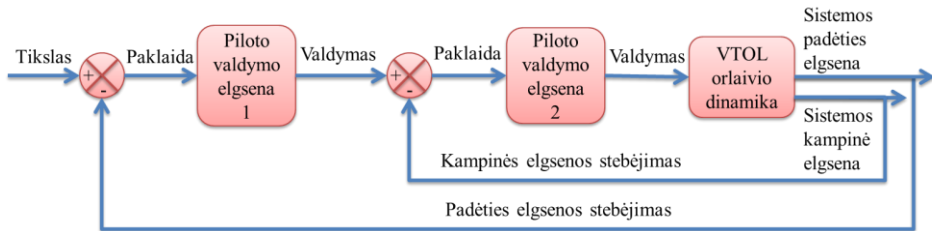


1.5 pav. Blakelock „kryžminis modelis“ su nedideliais pakeitimais (Blakelock 1991)

Fig. 1.5. A representation of crossover model with a slight modification (Blakelock 1991)

„Kryžminiame modelyje“ piloto ir orlaivio kontūre pažymėtas įėjimas yra tikslas, kuris gali remtis navigaciniu tikslu, gaunamu iš skrydžio plano arba

manevro segmento. Bet kuriuo atveju pilotą labiausiai domina nuokrypis, susidarantis tarp nurodyto tikslo ir esamos padėties. „Kryžminis modelis“ siekia atkartoti žmogaus dinaminį modelį, kai laiko kintamieji koreguojami, norint valdyti nuokrypį tarp esamos padėties ir numatyto tikslo. Pirmiausia siekiama išlaikyti orlaivio stabilumą, o vėliau siekiama išlaikyti numatytą trajektoriją. Tačiau modelis neįvertina neuroninio tinklo erdvės ir laiko elgsenos, kuriais grindžiamas piloto sprendimo priėmimas. Todėl galima daryti išvadą, kad piloto valdymo elgsenos teoriniai modeliai yra funkciniai inžineriniai modeliai, kurie nėra perduodami neurobiologiniu būdu (Kaygusuz 2015). Panašiu principu sudarytas ir kitas modelis, vadinamas „popierinio piloto“ modeliu. „Popierinis pilotas“ yra kitas bazinis modelis, kaip ir „kryžminis modelis“, kuris veikia McRuer ir Jex modelio ciklo viduje. Šis modelis taip pat aprašo valdymo sistemą ir jos cikliškumą. „Popierinio piloto“ modelis parodytas 1.6 paveiksle.



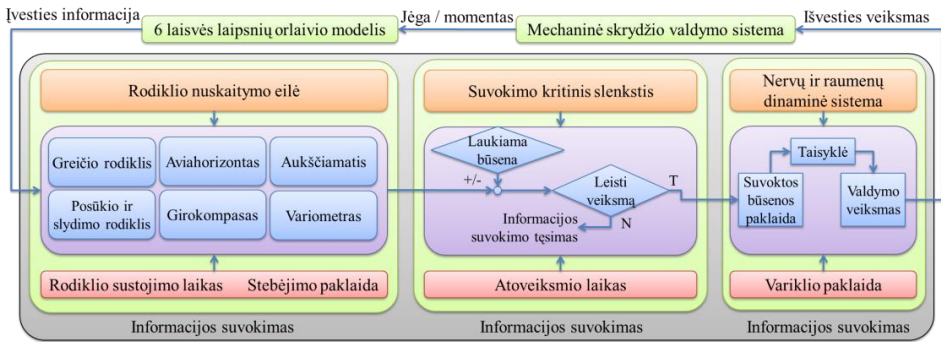
1.6 pav. „Popierinio piloto“ modelis (Blakelock 1991)

Fig. 1.6. Model of “paper pilot” (Blakelock 1991)

„Popierinis pilotas“ skiriasi nuo „kryžminio piloto“, nes į valdymo ciklą įtraukiama ne tik orlaivio padėtis, bet ir jo kampinė padėtis. Šis modelis yra daug sudėtingesnis, palyginti su „kryžminiu modeliu“ (Anderson 1970; Anderson, Connors, Dillow 1970). Jį sudaro du grįžtamieji ryšiai: vienas yra viduje, sujungtas su orlaivio dinamika, o kitas yra išorinis grįžtamasis ryšys, suteikiantis informacijos apie padėties elgseną. Tokie vidiniai ir išoriniai valdymo grįžtamieji ryšiai vis dar plačiai naudojami orlaivio valdymui modeliuoti (Kaygusuz 2015).

Piloto modelis – viena iš sudėtingiausių žmogų aprašančių sistemų. Taigi, iki šiol buvo formuluojamas ne vienas tiksliai aprašytas matematikos modelis. Dauguma piloto modelių yra grindžiami klasikine valdymo teorija, kai apytiksliai aprašomi kai kurie žmogiškųjų veiksnių aspektai. Kai kurie iš jų aprašo žmogiškojo elgesio rūšis. Yang (2014) pateikė struktūrizuotą piloto modelį, kurį sudaro trys pagrindinės dalys: informacijos suvokimas; sprendimo priėmimas; veiksmo atlikimas. Šios dalys sudaro žmogiškųjų veiksnių rinkinį. Dažniausiai visas piloto ir orlaivio modelis (1.7 pav.) įgyvendinamas realaus skrydžio treniruoklių sistemoje (Cai 2014).

Yang (2014) modelyje informacijos suvokimo dalies modeliai parodo skrydžio informacijos surinkimo eigą, kaip jutiklio dalis valdymo kontūre. Kiekviename valdymo kontūre skrydžio būsenų informacija stebima iš eilės su atsitiktine stebėjimo paklaida (E_{d_i}) (1.1). Du parametrai: rodiklio nuskaitymo eilė (Q) (1.2) ir rodiklio nuskaitymo laikas (T_D) (1.3), naudojami siekiant charakterizuoti eilės nuskaitymo eigą. Šiame etape keli rodikliai (d_i, d_j, \dots, d_k) yra atsitiktinai stebimi iš eilės Q . Per kiekvieną nuskaitymą, skrydžio būseną nuskaityma viename tam tikrame rodiklyje (nuskaitymo eigos vėlinimo laikas T_D .) Kiekviena rodiklio skrydžio būseną yra apibrėžta d_i (1.4).



1.7 pav. Piloto ir orlaivio sistemos modelio struktūrinė schema (Cai 2014)

Fig. 1.7. Block diagram of the pilot-aircraft system model (Cai 2014)

$$E_{d_i} = \{e_{x_{i,1}}, e_{x_{i,2}}, \dots, e_{x_{i,m}}\}, \quad (1.1)$$

$$Q = \{d_i, d_j, \dots, d_k\}, \quad (1.2)$$

$$T_D = \{t_{d_i}, t_{d_j}, \dots, t_{d_k}\}, \quad (1.3)$$

$$d_i = \{x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m}\}, \quad (1.4)$$

čia d_i, d_j, d_k – rodiklių nuskaitymas; t_{d_i} – kiekvieno d_i rodiklio sustojimo laikas; t_{d_j} – kiekvieno d_j rodiklio nuskaitymo laikas; t_{d_k} – kiekvieno d_k rodiklio nuskaitymo laikas; $x_{i,j}$ – skrydžio būseną d_i nuskaitymo metu; k ir m – koeficientai, nurodantys rodiklių kiekį ir skrydžio būseną.

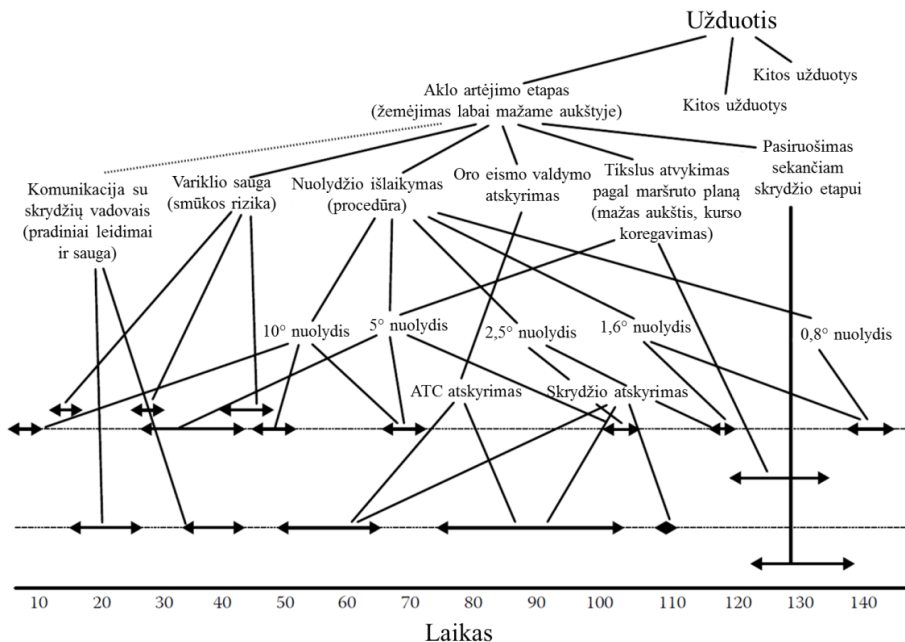
Sprendimų priėmimo modeliai sudaro skrydžio valdymo eigą. Šiame etape pilotas nusprendžia, ar pakoreguoti orlaivio padėtį pagal skirtumą tarp gautos ir pageidaujamos skrydžio būsenos. Du žmogiškieji veiksniai (reakcijos laikas T_{RT} ir pastebimas kritinis slenkstis) daro įtaką sprendimo priėmimo elementams. Pastebimas kritinis slenkstis (PKS) (angl. *PCT* – *Perceptive criticality threshold*) nurodo jautrųjį slenkstį, atpažįsta būsenos skirtumą ir pakoreguoja orlaivio

skrydžio padėtį; šiame etape laiko vertę parodo reakcijos laikas. Sprendimo priėmimo eiga gali būti išreikšta formule (1.5):

$$f_{SP}(x_i^p, x_i^d, PKS_i) = \begin{cases} 1, & |x_i^p - x_i^d| \geq PKS_i \\ 0, & \text{priešingu atveju} \end{cases} \quad (1.5)$$

čia f_{SP} – sprendimo priėmimo funkcija, kuri parodo, ar vykdomas valdymo judesys; PKS_i – skrydžio būsenos pastebimas kritinis slenkstis; x_i , x_i^p ir x_i^d – numatoma ir pageidaujama x_i vertė (Cai 2014). Sprendimų priėmimas neišvengiamai priklauso ir nuo valdymo eigos, kuri sąveikaujant pilotui ir orlaivui yra daugiaveiksmė.

Toliau pateikiami daugiaveiksmiškumo pavyzdžiai. Jei pilotas turi vienu metu atlikti keletą pareigų, kurių kiekviena apima veiklą seką, tuomet šios sekos įterpimas vadinamas daugiaveiksmiškumu (angl. *Multitasking*). Tai reiškia atliekamų veiksmų išplėtimą, remiantis planu. Daugiaveiksmiškumą sudaro išankstinis pasirengimas, ką atlikti, kartu su veiksmingu atsaku į įvykius ir aplinkybes (Wise 2010).



1.8 pav. Piloto daugiaveiksmiškumas viename skrydžio etape (Wise 2010)

Fig. 1.8. Multitasking by a pilot during one phase of the flight (Wise 2010)

Amalberti (1992) tyrė karinių pajėgų pilotus skrydžio treniruoklyje. Iš 1.8 paveikslo matyti dalis jo analizės apie pilotų, besileidžiančių į žemą skrydžio

lygi, aktyvumą treniruoklyje. 1.8 paveikslo apatinė linija žymi laiko juostą, o viršutinė dalis apibūdina užduoties tikslų ir potikslų hierarchiją. Lygiagrečios dvikryptės rodyklės apačioje parodo laiko trukmes, kiek kurias veiklas atlikdamas užtrunka pilotas. Šios rodyklės yra išdėstytos penkiose lygiagrečiose linijose, kurios parodo penkias pagrindines užduotis šiame skrydžio etape: variklio naudingumo išlaikymą esant mažam greičiui, orlaivio žemėjimo kampo valdymą, kurso valdymą, bendravimą su skrydžių vadovais ir pasirengimą kitam skrydžio etapui. Kitos pagrindinės užduotys, kurios vykdomos kituose skrydžio etapuose, yra šios: planuojamo manevro laiko išlaikymas; posūkių valdymas; saugos tikrinimas. 1.8 paveiksle matyti, kaip pilotas paskirstė savo laiką tarp skirtingų užduočių. Kartais vienos rūšies veikla įmanoma pasiekti du tikslus. Pilotui nebūtina užbaigti vienos antrinės užduoties, prieš ją pakeičiant kita. Iš tiesų tai dažnai neįmanoma atliekant valdymo užduotį, kurios padėtys ir įvykiai atsiranda ir turi būti įvykdyti per tam tikrą laiką. Paprastai pilotas atlieka vieną veiksmą vienu metu. Tačiau jis gali atlikti dvi užduotis kartu, kai naudojami skirtingi ištekliai, pvz., valdomas leidimasis koordinuojamas akimis ir varikliu, gali būti atliktas tuo pačiu metu kaip ir bendravimas su skrydžių vadovais, pasitelkus klausą ir kalbą (Wise 2010).

Kai kuriuos daugiaveiksmiškumo pavyzdžius sunku iliustruoti vienu paveikslu, todėl bus pateikiami jų aprašymai. Pavyzdžiui, Reinartz (1989), tirdamas trijų atominės elektrinės operatorių komandą, nustatė, kad jie gali dirbti su 9–10 skirtingomis užduotimis tuo pačiu metu. Kitas daugiaveiksmiškumo savybes stebėjo Benson (1990):

- daugiaveiksmiškumas gali būti planuojamas iš anksto (operatoriaus darbą tyrė Beishon (1974), kai planai 1,5 h sudaromi iš anksto). Tikėtina, kad šie planai yra daliniai ir neužbaigti laiko ir detalumo požiūriu. Suplanuotus veiklos pakeitimus gali lemti laikas arba įvykiai. Kai užduotys yra atliekamos dažnai, didžioji elgesio dalis gali būti grindžiama įpročiu;
- plano vykdymas su pertrūkiais gali sutrikdyti planuojamą veiklą. Kai išankstinis planas pateikiamas nevisas, tikrasis jo vykdymas priklausys nuo konkrečios situacijos. Kai kurios užduotys gali būti atliekamos, kai jos atsiranda darbo metu (Beishon (1974) pirmas pastebėjo ir tai pavadino įžvalgumu). Mažos svarbos veiklų trukmė gali būti iš anksto suplanuota, bet veiklos gali būti pritaikomos ir nenumatytiems atvejams. Likę nenumatyti atvejai priskiriami nepanaudotam laikui;
- tikimybių ir išteklių poveikis labai pasireiškia nenuspėjamosiose situacijose arba esant didelei nesėkmės tikimybei. Tuomet pilotai linkę prisiimti mažiausiai rizikos turinčių įsipareigojimų. Jeigu darbo krūvis yra didelis arba kintamas, pilotai gali vengti padidinti savo darbo krūvį, naudodami tam įvairias strategijas skirtingą darbo krūvį turinčiose situacijose.

Toliau aptarti galimi daugiaveiksmiškumo tyrimo mechanizmai. Atranka – paprastas daugiaveiksmiškumo pavyzdys. Jos metu pilotai turi stebėti keletą vaizduoklių, tuo pat metu sekdami trajektorijos pokyčius. Atliekant šias užduotis matematinė atrankos teorija taikoma kaip žmogaus dėmesio sutelkimo modelis. Atrankos modelyje dėmesio sutelkimo dažnis į informacijos šaltinį yra susijęs su pokyčio dažniu tam tikrame vaizdo šaltinyje. Modelis taikomas siekiant parodyti, kaip pilotai paskirsto savo dėmesį, stebėdami atsitiktinius pokyčius ir išlaikydami skrydžio aukštį ir kursą. Tačiau šis modelis nėra pakankamas, kad būtų atsižvelgiama į besikeičiantį elgesį sudėtingesniuose skrydžio etapuose (Wise 2010).

Amalberti (1992) atliko keletą stebėjimų, kaip pereinama nuo vienos užduoties prie kitos. Jis nustatė, kad:

- prieš pereidami prie kito esminio uždavinio, pilotai peržiūri situacijos būseną ir patikrina įvairios informacijos tarpusavio darną;
- prieš vykdydami užduotį, kuriai reikia šiek tiek laiko, pilotai įsitikina, kad jie veikia saugaus skrydžio režimu. Pvz., prieš analizuodami radaro vaizduoklį, pilotai patikrina, ar jie yra įjungę atitinkamą autopiloto režimą;
- laukdami grįžtamojo ryšio dėl vienos užduoties dalies, pilotai gali vykdyti kitos užduoties dalį, jei žino, kad ji yra trumpa, ir jiems belaukiant užteks laiko;
- kai atliekamos didelės rizikos ir didelio darbo krūvio užduotys, yra mažiau tikėtina, kad pilotai keis vieną užduotį kita, kai neatlikta pirmoji.

Šie rezultatai rodo, kad, pasibaigus pagrindinės užduoties daliai, pilotai patikrina, ar viskas gerai. Vėliau jie nusprendžia (nebūtinai sąmoningai), kuri užduotis bus kita, derindami savo išankstinį planą su metažiniomis apie alternatyvias užduotis, pvz., įvertindami užduočių skubą, saugą arba nuspėjamumą, sunkumą, reikalingumą, darbo krūvį ir trukmę.

Tiriant pilotus svarbu suprasti, kaip daugiaveiksmiškumas pasireiškia praktikoje. Daugiaveiksmiškumas gali būti iš anksto suplanuotas ir apimti metažinias apie alternatyvų elgesį. Tiek planavimas, tiek žinios tobulėja kartu su patirtimi, tai pabrėžia praktikos ir mokymo svarbą.

Daugiaveiksmiškumo pobūdis taip pat atkreipia dėmesį į sunkumus, kuriuos gali sukelti specialieji užduoties pateikimo ekranai. Jei kiekvienai užduočiai, pasitelkiant daugiaveiksmiškumą, naudojamas atskiras ekranas, sistemos vartotojas turėtų iškviesti skirtingus ekranus ir galbūt pakeisti kodavimo žodynus kiekvieną kartą, kai viena pagrindinė užduotis keičiama kita. Tam reikia papildomo pažinimo apdorojimo ir papildomos atminties apkrovos, gali būti sudėtinga sekti užduotis kartu. Tokius rezultatus lemia darbinė atmintis. Informacija, naudojama pagrindinėms užduotims, susijusioms su daugiaveiksmiškumu, atlikti, turi būti prieinama tuo pačiu metu ir lengvai

pritaikoma keliose sferose. Jei ši informacija nėra prieinama, tuomet koordinavimas ir naudingas elgesys nėra įmanomi.

Daugelyje realių užduočių kiti veiksniai turi daugiau įtakos našumui, negu pagrindinės jutimo galimybės. Nepaisant to, yra naudinga suprasti šiuos jutimo ir suvokimo procesus, nes jiems keliama bendri pažinimo apdorojimo tikslai (Wise 2010), todėl kitame poskyryje bus aptariami pilotui reikalingi įgūdžiai ir žinios, taip pat sprendimams priimti reikalingos informacijos valdymas.

1.2.2. Piloto įgūdžiai ir žinios

Pasak Gruszecki (2007), atsižvelgdami į specialius piloto ir orlaivio reikalavimus, turime turėti omenyje visą žmogaus ir mašinos sistemą. Operatoriaus ir skraidančio objekto reikalavimai neturėtų būti atskirti, kadangi skraidantis objektas yra sukurtas žmogiškoms operatoriaus reikmėms. Kita vertus, žmogus yra apmokytas pasiekti visos piloto ir orlaivio sistemos geriausius rezultatus. Analizuojant tam tikras skraidančio objekto savybes, galima paklausti: „Ar įmanoma suformuluoti operatoriaus gabumus tokiam skraidančiam objektui? Kaip įvertinti pilotavimo techniką mokymo proceso metu?“ (Gruszecki 2007).

Prieš atsakant į šiuos klausimus, reikia remtis šiomis sąvokomis: operatoriaus įgūdžiai, kai atliekami paprasti veiksmai (refleksai, įpročiai), galimybė panaudoti faktus (patirtis) ir įgūdžių susiejimą su žiniomis (išvados). Žvelgiant į piloto-operatoriaus sistemą kaip struktūrą, kuri gali suvokti tris pirmiau minėtų operacijų grupes, galima formuluoti skraidančio objekto valdymo reikalavimus. Šie reikalavimai įvardinti teisės aktuose, taisyklėse ir procedūrose ir naudojami mokant ir treniruojant pilotus. Jie taip pat susiję su žinių ir įgūdžių stebėjimu (Gruszecki 2007).

Piloto žinių apimtį sudaro teoriniai ir eksperimentiniai orlaivio valdymo aspektai ir jo sąveika su aplinka. Pilotas-operatorius turėtų būti supažindintas su skraidančių objektų ypatumais (įskaitant visus ryšius), atmosferos reiškinais ir valdymo taisyklėmis. Šios žinios turėtų leisti pilotui bendrauti ir skristi bet kurioje Žemės vietoje, kad įgyvendintų visas reikiamas antžemines operacijas (degalų užpylimas, techninės pagalbos užsakymas ir keleivių aptarnavimas) ir net išmanytų skirtingų bendruomenių įpročius. Tam tikrų žinių naudojimas konkrečioje situacijoje gali būti laikomas gebėjimu daryti išvadas. Įgūdis sujungti žinias su faktais leidžia pilotui optimizuoti žemesniojo lygmens veiksmus (suformuoti refleksus) (Gruszecki 2007).

Patirtį galima apibrėžti, kaip gebėjimą atlikti tam tikrus veiksmus nustatytu laiku. Toks patirties apibrėžimas tapatinamas su atsimenamų faktų įgijimu. Šis gabumas yra atnaujinamas ir keičiamas priklausomai nuo surinktų faktų. Patirtis yra įgyjama:

- skraidant įvairiomis sąlygomis;
- mokantis su realiais objektais;
- mokantis su treniruokliais;
- mokantis apie orlaivio eksploatavimą.

Operatoriaus patirties įvertinimas gali būti išmatuojamas. Gali būti taikomi įvairūs matavimai (diapazonas, aproksimacijos kokybė, neraiškiosios logikos diapazonas ir klasifikacija) siekiant nustatyti, kurie įgūdžiai buvo įgyti (Gruszecki 2007).

Gausiausią operacijų grupę sudaro žemojo lygmens treniruočių veiksmi. Tokių užduočių vykdymas yra glaudžiai susijęs su paprastais fiziniais veiksmais. Šie veiksmi yra suvaržyti tam tikrais tikslumo slenksčiais (Gruszecki 2007).



1.9 pav. Piloto pažangiosios patirties sritys (Gruszecki 2007)

Fig. 1.9. Areas of pilot's know-how (Gruszecki 2007)

Yra trys piloto pažangiosios patirties sritys (hierarchinė struktūra pavaizduota 1.9 paveiksle), kurios naudojamos mokant ir treniruojant pilotus. Gruszecki (2007) sutelkia dėmesį į piloto įgūdžių tobulinimą. Šiam tikslui mokslininkai naudojo AL200MCC skrydžio treniruoklį ir WOMBAT situacijos suvokimo ir streso toleravimo tyrimo sistemą.

Analizuojant skrydžio charakteristikas, pilotai tobulėja trijose aplinkose (Lacabanne 2012):

- organizacinė aplinka – tai apribojimų rinkinys, kuris gali būti nustatytas aviakompanijos vadovybės arba karo aviacijos karinių pajėgų;
- darbinė aplinka – tai apribojimų rinkinys, kurį nustatyto skrydžio vadovai;
- fizinė aplinka – aplinka, kurioje orlaivis skrenda (turbulencija, krituliai, antžeminės arba ore esančios kliūtys ir kt.).

Tobulėdamas šiose aplinkose, pilotas turi atlikti keturias iš anksto nustatytas užduotis (Lacabanne 2012; Wickens 2002):

- valdyti – skrydžio trajektorijoje valdyti orlaivį;
- naviguoti – nukreipti orlaivį iš jo pradinės padėties į paskirties vietą;
- komunikuoti – teikti duomenis, prašyti skrydžio instrukcijų ir priimti informaciją;
- stebėti – turimus išteklius (degalų kiekį, variklio temperatūrą, tepalo slėgį ir kt.).

Visi šie įgūdžiai ir taisyklės išugdo užduotims atlikti reikalingus psichomotorinius įgūdžius, kurie leidžia tiksliai valdyti orlaivį. Psichomotorinei sričiai priskiriami refleksyvūs judesiai arba refleksai, pagrindiniai judesiai, fizinės galios, veiklos įgūdžiai, neverbalinio bendravimo būdai, žmogaus mokėjimas, sudėtingi judesiai, kuriems reikia jėgos, greičio, judrumo, lankstumo, skirtingų judesių koordinacijos. Dave (1968) psichomotorinių tikslų taksonomijoje išskiria 5 lygius (Bulajeva 2007):

- imitavimo – stebint kitų veiklą mėginama ją imituoti, kopijuoti;
- manipuliavimo – tam tikrų veiksmų mokomasi, siekiant tiksliai vykdyti instrukcijas. Veiksmai daug kartų kartojami;
- tikslumo – atsiranda daugiau precizikos, atliekant sudėtingus judesius daroma mažiau klaidų;
- artikuliacijos – vyksta atskirų veiksmų koordinavimas, harmonizavimas.
- natūralizavimo – veiksmai tampa natūralūs ir lengvai, profesionaliai atliekami.

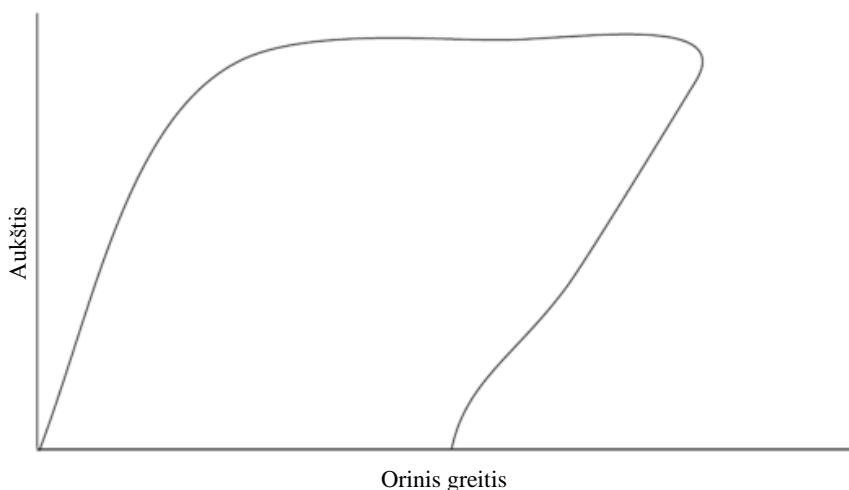
Taigi vykdydamas skrydį pilotas remiasi mokymo metu sukauptomis žiniomis, aprėpiančiomis skirtingo platumo darbinės aplinkas, nuo aviakompanijoje vyraujančių normų iki konkrečios, jį supančios, fizinės aplinkos. Taip pat naudojama tinkama užduočių vykdymo seka, įgyta mokymo ir treniruočių metu, susiformavus psichomotoriniams įgūdžiams. Siekiant kontroliuoti mokymo efektyvumą, keliama konkretūs užduočių atlikimo reikalavimai, kurie ir bus toliau aptariami.

1.3. Piloto skrydžių vertinimui keliami reikalavimai

1.3.1. Skrydžio vykdymas

Norint tinkamai įvertinti skrydžio vykdymo galimybes, būtina atsižvelgti į visą žmogaus ir mašinos sistemą. Operatoriui keliami reikalavimai neišvengiamai turi priklausyti nuo orlaivio galimybių, kurios turi tapti arba integruota skrydžių vertinimo modelio dalimi, arba būti įvertinamos prieš parenkant tam tikrą vertinimo užduotį.

Tang (2012) teigia, kad, norint išspręsti būsimų didelių oro srautų oro erdvės valdymo problemas, viena iš pagrindinių tolimesnių naujos kartos technologijų oro eismo valdymo automatizavimo sistemose yra 4D trajektorijų vertinimas. Pagal įvairių orlaivių tipų skrydžio profilį ir dinamikos modelius, skirtingomis skrydžio sąlygomis, būtų naudojamas hibridinės sistemos modelis, kuris perjungia orlaivį iš vieno skrydžio etapo į kitą pakeisdamas nuolatinę orlaivio būseną, kai sukurta viena būsena. Pagal tam tikrą orlaivio svorį, yra du parametrai, kurie apibrėžia orlaivio skrydžio gaubtinę: aukštis ir orinis greitis. Skrydžio gaubtinė pavaizduota 1.10 paveiksle, kuriame matoma, kaip greitai, lėtai ar aukštai orlaivis gali skristi (Peters 2012). Be to, oro temperatūra ir vėjo greitis naudojami pakeičiant tikrąjį orinį greitį į žemės greitį; naudojamas hibridinės sistemos vystymo imitavimas, siekiant įvertinti orlaivio 4D trajektoriją. Šių technologijų tyrimas įrodė, kad 4D trajektorijos vertinimas su hibridinės sistemos modeliu gali parodyti orlaivio skrydžio dinamines būsenas ir ar jis atitinka planuoto skrydžio padėties profilio poreikius (Tang 2012).

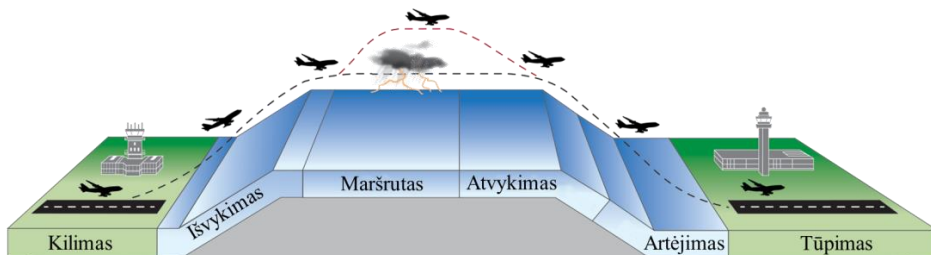


1.10 pav. Skrydžio gaubtinės pavyzdys (Peters 2012)

Fig. 1.10. An example of flight envelope (Peters 2012)

Skrydžio metu atliekamos užduotys yra ne to paties prioriteto. Orlaivio valdymo ir navigacijos užduotys turi didesnę pirmumą negu komunikacija ir kontrolė (Wicken 2002). Be to, pagal skrydžio etapus kai kurios užduotys labiau įtraukia negu kitos (pakilimas yra pagrindinė orlaivio valdymo užduotis). Bendroju atveju, pagal tam tikras procedūras, skrydžio planas yra suskirstytas į devynis skrydžio etapus: pasiruošimas skrydžiui, riedėjimas iš perono ant kilimo ir tūpimo tako (KTT), pakilimas, kopimas, skrydis maršrutu, leidimasis,

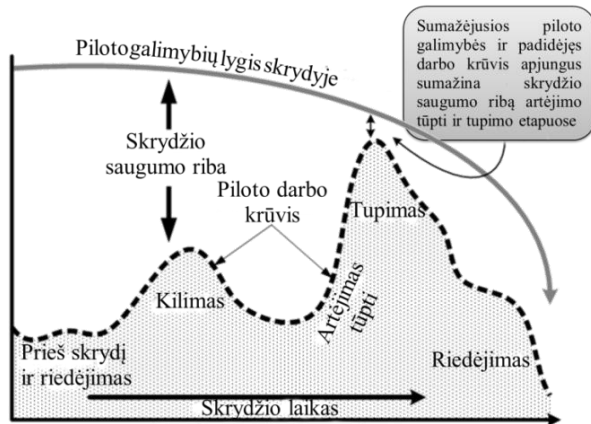
artėjimas, tūpimas ir riedėjimas nuo KTT į peroną (1.11 pav.) (Savičienė 2012; ICAO 2009a; Lacabanne 2012).



1.11 pav. Skrydžio etapai (www.propilotmag.com)

Fig. 1.11. Flight phases (www.propilotmag.com)

Piloto darbo krūvis kinta priklausomai nuo skrydžio etapo (1.12 pav.). Keletas tyrimų (Durso 2011; Durso 2008; Tenney 1998) parodė, kad reikliausi skrydžio etapai yra pasiruošimas skrydžiui, riedėjimas, kilimas (skrydžio pradžia) ir leidimasis, artėjimas ir tūpimas (skrydžio pabaiga). Tai galima paaiškinti tuo, kad pakilimo ir tūpimo etapai, kurie vyksta prie žemės, saugos požiūriu sukelia didesnę riziką. Be to, šiuose etapuose atsiranda daug pokyčių (pvz., orlaivio konfigūracijos) ir bendravimo su skrydžių vadovais. Taigi šiuose skrydžio etapuose piloto informacija apdorojima daugiausia (Schvaneveldt 2001), tuo pačiu didžiausias būna ir darbo krūvis (Lacabanne 2012).

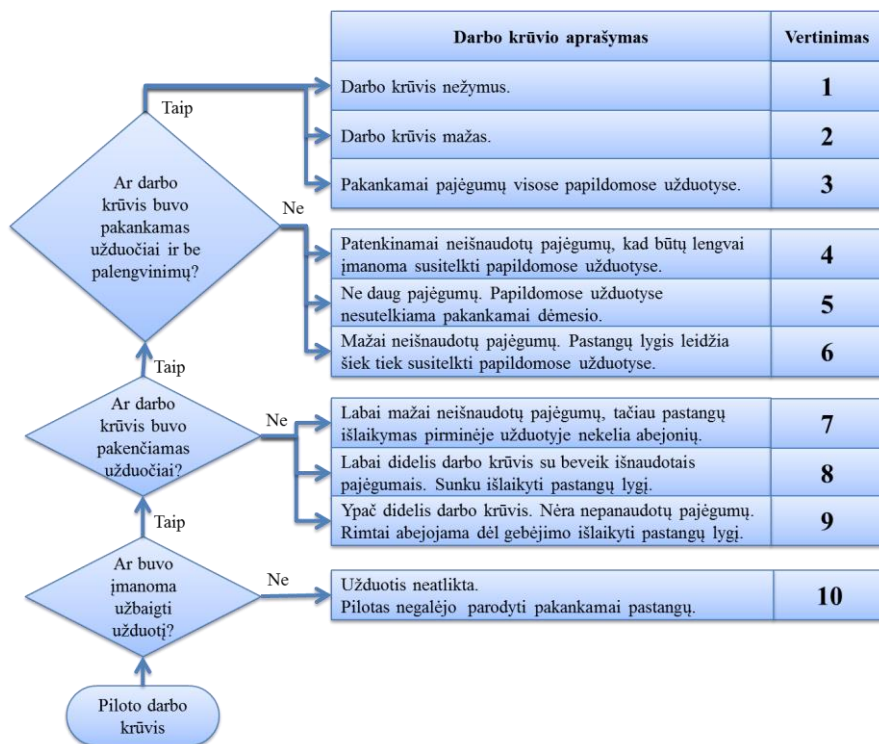


1.12 pav. Piloto galimybių ir darbo krūvio vertinimas skrydžio etapuose (www.langleflyingschool.com)

Fig. 1.12. Pilot capability and workload evaluation in flight phases (www.langleflyingschool.com)

Piloto padėties ir suvokimo praradimas yra darbo krūvio ir laiko apribojimų pasekmė, pvz., dėl to atsiranda dėmesio sutelkimas (angl. *Attentional tunneling*)

(Durso 2011). Tad susidaro sąlygos kilti incidentui arba avarijai, pvz., kaip orlaivio „Eastern Airlines L1011“ sudežimas į Evergleidso pelkėtąsias žemumas (Wickens 2002). Galima teigti, kad prastas padėties suvokimas gali lemti klaidingą sprendimų priėmimą (Lacabanne 2012). Tokių padėties suvokimo praradimą lemia darbo našumo sumažėjimas, t. y. piloto galimybių ir pastangų, reikalingų užduočiai atlikti, neatitikimas. Vienas iš būdų nustatyti darbo našumą yra Bedfordo vertinimo skalė (1.13 pav.).



1.13 pav. Bedfordo piloto darbo krūvio vertinimas (Chin 2006)

Fig. 1.13. Bedford workload rating (BWR) (Chin 2006)

Bedfordo vertinimo skalė (Roscoe 1990) – vienos dimensijos vertinimo skalė, skirta piloto nepanaudotiems protiniams pajėgumams nustatyti, kai atliekama užduotis. Viena dimensija įvertinama naudojant hierarchinį apsisprendimo algoritmą pagal dešimties balų vertinimo skalę, kurios kiekvienas taškas apibūdina darbo krūvio lygį. 1.13 paveiksle parodyta, kaip taikomas apsisprendimo algoritmas (Chin 2006).

Bedfordo skale paprastai, greitai ir lengvai įvertinama užduotis didelio darbo krūvio aplinkose, tačiau vertinimo skalė neturi diagnostikos galimybių.

Darbo našumas įvertinamas tik retrospektyviai ir neįmanoma jo prognozuoti į priekį.

1.3.2. Piloto skrydžiui keliami reikalavimai

Piloto sugebėjimas tiksliai valdyti orlaivį jam nurodyta trajektorija yra kertinis skrydžio vertinimo kriterijus. Todėl vertinimo sistema turėtų apimti konkrečiose užduotyse nustatytus reikalavimus. Kiekvienas oro uostas turi savo procedūrų rinkinį, kuris priklauso nuo vietovės, vyraujančio vėjo ir kitų veiksnių.

Orlaivio navigacijos reikalavimuose apibrėžiamos įvairių navigacinių priemonių skrydžio tikslumo ribos, priklausomai nuo zonų, kuriose skrenda orlaivis: skrydis maršrutu, skrydis ratu, skrydis terminale, tupiant ir pan. Tačiau dokumentuose vienareikšmiškai apibrėžiama skrydžio atitiktis nurodytiems reikalavimams. Orlaivis 95 % savo skrydžio laiko neturi nukrypti nuo jam nurodyto skrydžio tunelio (ICAO 2001; Shawlee 2008; FAA 2002).

Svarbiausi skrydžio parametrai yra:

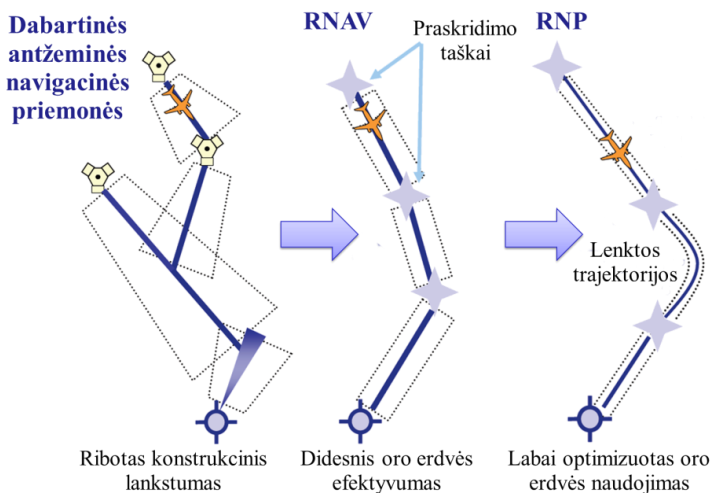
- trajektorijos išlaikymas;
- aukščio išlaikymas;
- greičio išlaikymas.

Vertinant tiek teorinius, tiek praktinius pilotų įgūdžius, galima aptikti, kad įvairioje literatūroje pagrindinę vertinimo skalę sudaro keturi lygmenys: labai gerai, gerai, įskaityta, neįskaityta. Arba piloto pasiekimų lygis vertinamas pagal dešimties balų sistemą. Paprastai balai nuo 8 iki 10 laikomi teigiamais, o žemiau 8 balų – neigiamais.

Chriukin (1996) savo treniruoklio mokymų programoje pateikė vizualiųjų ir skrydžių pagal prietaisus vertinimo normatyvus (A priedas). Bendras įvertinimas nustatomas pagal atskirų programos elementų įvertinimus. Panašius normatyvus (A priedas) yra išleidusi Civilinės aviacijos administracija (CAA) skirtingiems orlaivių ir licencijų tipams (CAA 2006). CAA šiuos normatyvus skirsto į tris grupes: normatyvai pilotams mėgėjams; normatyvai komercinės aviacijos pilotams; normatyvai avialinijų transporto pilotams. Pateiktos abi normatyvų lentelės (A priedas) skirsto skrydį į tris etapus: kilimas; skrendant maršrutu; žemėjimas. CAA (2006) taip pat papildomai pateikė prietaisinio skrydžio taisykles (PST) (angl. *IFR – Instrument flight rules*). Šiuose normatyvuose matyti trys esminiai skrydžio parametrai: skrydžio kursas (angl. *HDG – Heading*), aukštis, greitis. Kai kuriuose etapuose pateikti ribiniai skrydžio parametrai: vertikalusis greitis, lėktuvo vietos nustatymo ribos, laikas virš praskridimo punktų, orlaivio posvyrio kampai. CAA (2006) normatyvus pateikė su didžiausiomis leidžiamosiomis vertėmis, o Chriukin (1996) kartu sudarė

keturbalę vertinimo skalę: labai gerai; gerai; įskaityta; neįskaityta. Mažiausi reikalavimai keliami pilotams mėgėjams, o didžiausi – avialinijų pilotams.

Didžiausias leidžiamas kurso nuokrypis yra 10° , o avialinijų pilotams – 5° . Aukščio išlaikymas ± 150 ft (± 45 m), avialinijų pilotams – ± 100 ft (± 30 m). Toliau plačiau aprašomi orlaivio greičiai. Kilimo metu, aukštėjimo ir žemėjimo greičio vertės nesutampa. Tariama, kad kilti mažesniu negu nurodytu vertikaliuoju greičiu yra nesaugu dėl galimybės susidurti su antžeminiais objektais. Todėl pilotams mėgėjams orlaivio atplyšimo greitis turi būti $+15/-5$ kt ($+27/-9$ km/h), o avialinijų pilotams – $+5/0$ kt ($+9/0$ km/h). Aukštėjimo greitis, taikomas mėgėjams pilotams, yra ± 15 kt (± 27 km/h), komercinių skrydžių pilotams – ± 10 kt (± 18 km/h), o avialinijų pilotams – ± 5 kt (± 9 km/h). Chriukin (1996) aukštėjimo greičiui suteikia leidžiamą ± 20 km/h nuokrypį nuo nurodytos reikšmės.



1.14 pav. Navigacijos kaita (Church 2013)

Fig. 1.14. The change in navigation (Church 2013)

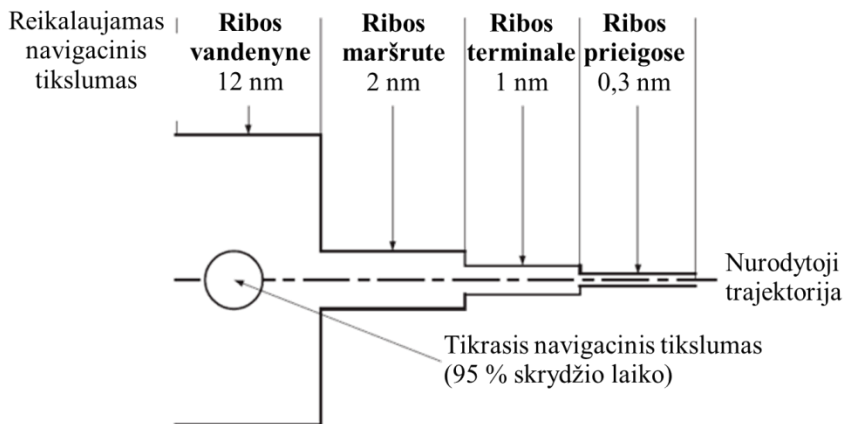
Reikia įvertinti ne tik studento skrydžio tikslumą, bet būtina atsižvelgti ir į matavimo prietaiso paklaidas, šiuo atveju, palydovinės navigacijos vietos nustatymo tikslumą arba kitų naudojamų jutiklių tikslumą.

Reikalaujamas navigacinis tikslumas (angl. *RNP – Required navigation performance*) – tai tikslumo reikalavimas, kad orlaivis bent 95 % viso skrydžio laiko nenukryps nuo nurodytos trajektorijos, nei reikalaujama. Arba, 95 % orlaivių kiekvienu metu nebus nukrypę nuo nurodytos trajektorijos daugiau, nei reikalaujama. RNP taip pat panaudojamas saugiam atstumui tarp oro kelių sudaryti (1.20 pav.). RNP parametras nusako navigacinio parametro tikslumą,

pvz., RNP-1 apibrėžia tunelį, kurio plotis yra 1 NM nuo nurodytos trajektorijos. RNP-5 apibrėžia 5 NM ir pan. (Church 2013; EUROCONTROL 1998).

1.14 paveiksle lyginami skirtingi navigacijos būdai. Iš pradžių naudota navigacija pagal antžemines navigacines priemones, VOR, DME. Tačiau naudojantis vien jomis, konstrukcinis lankstumas yra labai ribotas, trajektorijos tampa laužytos ir neefektyvios. Skrendant pagal praskridimo taškus (angl. *WP* – *Waypoints*), pasiekiamas didesnis oro erdvės naudojimo efektyvumas, tačiau skrydžio tuneliai čia vis dar platesni. Galiausiai, naudojantis RNP, keliai tampa dar siauresni ir pasiekiamas labai optimizuotas oro erdvės naudojimas, taip pat skrendama ir labiau lenktomis trajektorijomis. 1.15 paveiksle pavaizduotos skirtingos RNP ribos skirtingose zonose, lyginant su realiu navigaciniu tikslumu.

Plačiausia RNP yra virš vandenyno, o siauriausia – prieigose, tai susiję tiek su skrydžių tankumu, tiek su vykdomų manevrų sudėtingumu. Pagrindinė RNP naudojimo priežastis yra pasiekiamas orlaivių sutankinimas (1.16 pav.). Taigi, akivaizdu, kad tam reikia didesnio orlaivio navigacinio tikslumo ir mažesnių orlaivio skrydžio trajektorijos paklaidų.



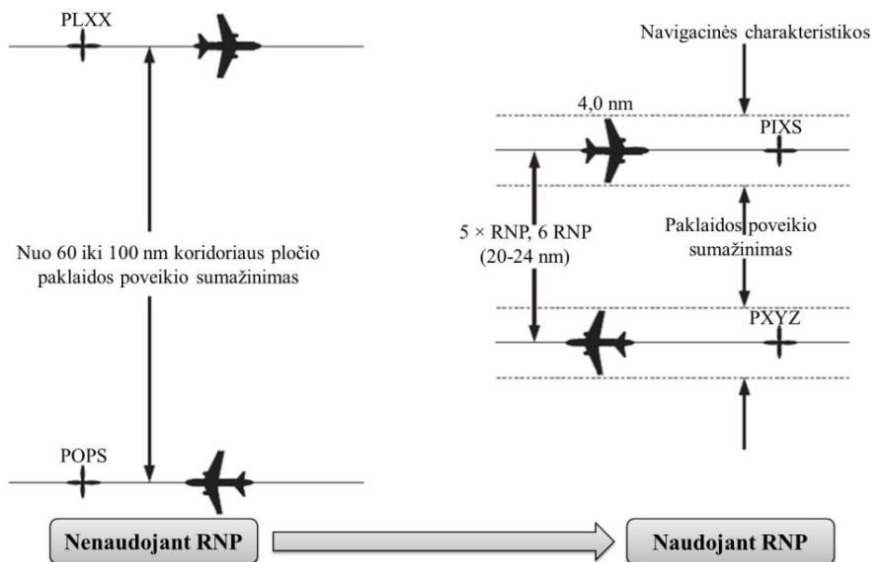
1.15 pav. Tikrasis ir reikalaujamas navigacinis tikslumas (Moir 2003)

Fig. 1.15. Actual and required navigation performance (Moir 2003)

Europoje buvo sukurti du RNAV standartai: bazinė RNAV (BRNAV). BRNAV buvo įdiegtas 1988 m. ir yra lygiavertis su RNP-5 naudojant RNAV. Navigacija gali būti atliekama šiais būdais:

- DME / DME;
- VOR / DME su 62 NM VOR atstumo apribojimu;
- inercinė sistema naudojanti radijo navigacijos duomenų atnaujinimą arba jos naudojimo apribojimas iki 2 h nuo antžeminės padėties nustatymo atnaujinimo;

- LORAN-C su apribojimais;
- GPS su apribojimais (Moir 2003).



1.16 pav. Buvusių ir esamų maršrutų struktūrų palyginimas (Moir 2003)

Fig. 1.16. Comparison of historical and current route structure (Moir 2003)

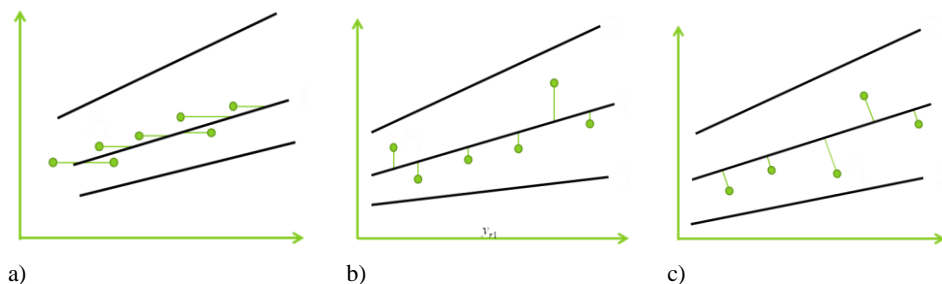
Nuo 2005 metų pagrindiniai navigacijos šaltiniai yra DME / DME, VOR / DME ir GPS. Remiantis Advisory Circular AC 90-96, kuri patvirtino JAV operatoriai ir orlaivių valdytojai, juos galima naudoti pagal vizualaus skrydžio taisykles (VST) (angl. *VFR – Visual flight rules*) Europos oro erdvėje, kuri priskirta prie bazinės zoninės navigacijos (BRNAV).

Susumavus piloto ir orlaivio sąveikos ypatybes, reikalingus skrydžiui vykdyti įgūdžius bei specialias orlaivio ir naudojamo navigacinio metodo charakteristikas galima išskirti susidarančias sistemoje paklaidas.

Moir (2003) išskiria trijų tipų skrydžio paklaidas:

- trajektorijos tikslumo paklaida – skirtumas tarp nurodytos skrydžio trajektorijos ir tikrosios skrydžio trajektorijos;
- trajektorijos išlaikymo paklaida – piloto arba autopiloto sistemos gebėjimas prisiderinti prie nurodytos skrydžio trajektorijos;
- vietos paklaidos apskaičiavimas – navigacinės sistemos gebėjimas apskaičiuoti vietą ir vientisumą, kuris gali būti patikrintas šiame procese.

Dažniausiai, vertinant skrydžio trajektorijas, paklaidos vertinamos skersiniais nuokrypiais, tačiau galima matuoti ir horizontaliuosius, bei vertikaliuosius trajektorijų nuokrypius (1.17 pav.).



1.17 pav. Galimi skrydžio trajektorijų nuokrypių matavimo būdai: a) horizontalieji nuokrypiai; b) vertikalieji nuokrypiai; c) skersiniai nuokrypiai

Fig. 1.17. Possible deviation measurements methods of flight trajectory: a) horizontal errors; b) vertical errors; c) cross track errors

Alter (2001) formuluoja bendrąją sistemos nuokrypį (BSN) (angl. *TSE* – *Total system error*), susijusį su orlaivio nuokrypiu nuo nurodyto skrydžio kelio (1.18 paveikslas – horizontaliajai ir 1.19 paveikslas – vertikalajai trajektorijai). BSN sudaro navigacijos sistemos nuokrypis (NSN) (angl. *NSE* – *Navigation system error*), kuris atsiranda dėl navigacinės sistemos vietos nustatymo paklaidų (navigacinio jutiklio paklaidos, imtuvo paklaidos), trajektorijos apibrėžimo nuokrypis (TAN) (angl. *PDE* – *Path definition error*), ir skrydžio techninis nuokrypis (STN) (angl. *FTE* – *Flight technical error*), kuris atsiranda dėl piloto arba autopiloto paklaidų. Sumažinus NSN, TAN arba STN nuokrypius, sumažėtų ir BSN nuokrypis, kuris apibrėžia, kaip pilotas geba skristi tiksliomis skrydžio trajektorijomis. BSN nuokrypis susijęs su NSN ir STN paklaidomis tokia lygtimi (1.6):

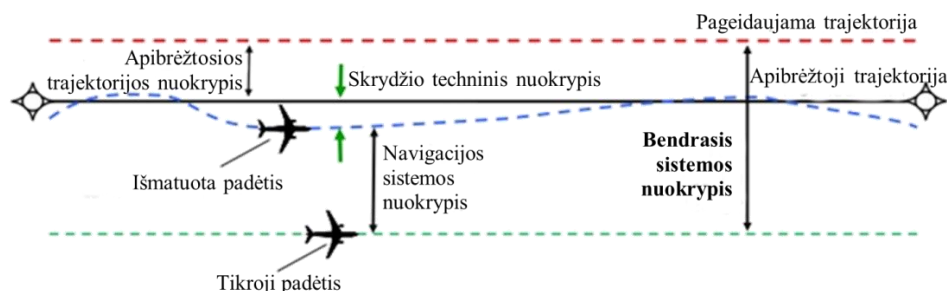
$$BSN = NSN + STN + TAN, \quad (1.6)$$

čia BSN, NSN ir STN atitinka nuokrypių elementus. Taip pat (1.7):

$$\sigma_{BSN}^2 = \sigma_{NSN}^2 + \sigma_{STN}^2 + \sigma_{TAN}^2, \quad (1.7)$$

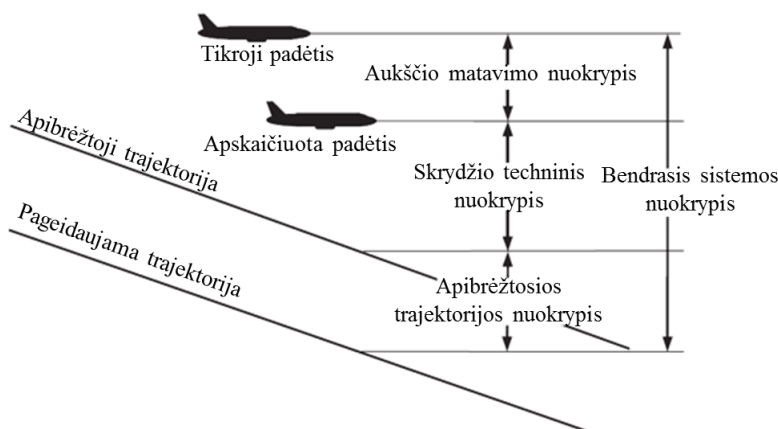
čia σ_{BSN} , σ_{NSN} , σ_{STN} , σ_{TAN} – atitinkamų standartinių nuokrypių paklaidos (Alter 2001).

Matavimų teorijoje išskiriamos trys pagrindinės paklaidos: atsitiktinės paklaidos (angl. *Random errors*); sisteminės paklaidos (angl. *Systematic errors*); bei grubios paklaidos (angl. *Gross errors*).



1.18 pav. Horizontalieji navigacijos nuokrypiai (Church 2013)

Fig. 1.18. Horizontal navigation errors (Church 2013)



1.19 pav. Vertikalieji navigacijos nuokrypiai (Moir 2003)

Fig. 1.19. Vertical navigation errors (Moir 2003)

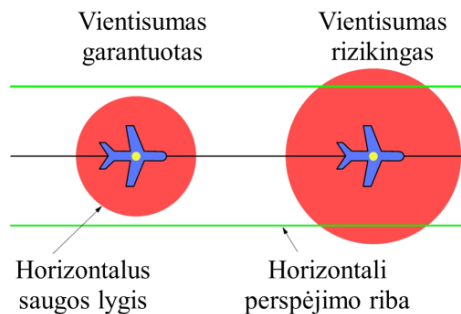
Atsitiktines paklaidas sukelia nevaldomi svyravimai, kurie daro įtaką eksperimentiniams rezultatams. Pavyzdžiui, oro svyravimai vyksta, kai studentai atidaro ir uždaro laboratorijos duris ir taip sukelia slėgio pokyčius rodmenims. Esant pakankamam matavimų skaičiui, matavimo rezultatai tolygiai pasiskirsto apie vidutinę vertę. Teigiamoji ir neigiamoji duomenų sklaida charakterizuoja atsitiktines paklaidas. Įvertintas standartinis nuokrypis (duomenų rinkinio paklaidų intervalas) dažnai pateikiamas kartu su matavimo duomenimis, nes atsitiktines paklaidas yra sunku pašalinti. Be to, per duomenų taškus brėžiama linija siekiant nustatyti tikrąsias matavimo vertes.

Sisteminės paklaidas sudaro prietaisų, metodologinės arba žmogiškosios paklaidos, kurios paveikia matuojamų duomenų tikslumą. Šios paklaidos nuolat nukrypsta į vieną pusę nuo tikrosios vertės. Sisteminių paklaidų pavyzdžiai: prietaisų paklaidos atsiranda, kai, tarkime, GNSS imtuvo vietos nustatymo vertė pasislenka nuo tikrosios vertės; metodologinės paklaidos atsiranda dėl blogų

prietaiso rodiklių; žmogiškosios paklaidos atsiranda dėl piloto netinkamai pasirinkto skrydžio orientyro. Sisteminės paklaidos gali būti nustatomos ir pašalinamos po kruopščių eksperimentinių metodų patikrinimo, prietaisų kryžminio kalibravimo.

Grubios paklaidos atsiranda dėl piloto neatsargumo arba matavimo įrangos gedimo. Šios išskirtinės vertės yra gerokai didesnės arba mažesnės nuo tikrosios vertės ir jos paprastai yra pašalinamos vertinant duomenis. Q testas yra sisteminis metodas, leidžiantis įvertinti, ar minėtos išskirtinės vertės turėtų būti pašalintos iš duomenų vertinimo.

Taigi, norint įvertinti piloto skrydžio tikslumą (σ_{FTE}), būtina parinkti tikslią vietos nustatymo sistemą (su kuo mažesne σ_{NSE} paklaida), kad kuo mažiau iškreiptų piloto skrydžio vertinimo rezultatus. Naudojant vien karines GPS (angl. *Global positioning system*) ar GLONASS (angl. *Global orbiting navigation satellite system*) sistemas, vietos nustatymo duomenys nėra itin tikslūs, todėl vietos paklaidoms mažinti vertėtų papildomai naudoti patikslinančiąsias skirtumines sistemas (angl. *DGPS – Differential GPS*). Tokias palydovines pataisas palaikančius imtuvus galima nebrangiai įsigyti. Minėti SBAS (angl. *Satellite-based augmentation system*) palaikymą turintys imtuvai gali veikti tiek su JAV WAAS (angl. *Wide-area augmentation system*), tiek su Europos EGNOS (angl. *European geostationary navigation overlay service*) geostacionariomis palydovinėmis sistemomis.



1.20 pav. Saugos lygis su perspėjimo riba (Waegli 2003)

Fig. 1.20. Protection level vs alert limit (Waegli 2003)

Navigacijos palydovų tariamųjų atstumų pataisos leidžia tiksliau apskaičiuoti vietos nustatymo koordinates. Pataisų tikslumas apibrėžiamas standartiniu nuokrypiu. Vientisumas patikrinamas padėties standartiniu nuokrypiu ir taip sukuriamas saugos lygis (1.20 pav.). Patikimumo lygis apskaičiuojamas dauginant padėties standartinį nuokrypį iš koeficiento, kuris priklauso nuo skrydžio etapo. Tuomet saugos lygis palyginamas su perspėjimo

riba (apibrėžta skrydžio etape) nustatant, ar padėties vientisumas garantuojamas (Waegli 2003).

Pilotas arba skrydžio valdymo kompiuteris (angl. *FMC – Flight management computer*) turi iššūkį apskaičiuoti orlaivio skrydžio kelią ir kryptį, kad išliktų nurodytoje trajektorijoje nepaisant besikeičiančio vėjo krypties ir jo greičio, kuris priverčia keisti orlaivio posvyrio kampą (Herndon 2008). Alter (2001) tyrė kai kurias naujas idėjas, tokias kaip skrydžio tunelius (ST) (angl. *HITS – Highway in the sky*), kurie ne tik sumažina FTE paklaidas, bet ir sumažina piloto darbo krūvį, palyginti su tradiciniais skrydžio prietaisais. Vaizduoklių papildymas skrydžio tuneliais, žemės reljefo vaizdavimu ir įspėjimu pagerintų piloto padėties suvokimą.

1.4. Piloto skrydžio vertinimo metodai

Huang S. (2010) savo straipsnyje tyrė metavertinimo sistemos metodus. Scriven (1969) pirmą kartą pristatė terminą metavertinimas (angl. *Metaevaluation*), kuris skirtas mokymo produktams vertinti. Metavertinimas apibrėžiamas, kaip „bet koks vertinimo įvertinimas, vertinimo sistema arba vertinimo prietaisas“ (Stufflebeam 2001; Huang S. 2010; Scriven 1969). Mokymo vertinimas yra administracinė mokymo proceso funkcija. Mokymo įstaigų dėstytojų vertinimas – pagrindinė personalo administracinė funkcija, pagal kurią atliekamas sertifikavimas, atranka, priskyrimas, paaugstinimas, mokymo priežiūra, priedų už kadencijas ir profesinį tobulėjimą priskyrimas (Glasman, Heck 2003; Stufflebeam, Webster 1988; Huang S. 2010). Personalas ir mokymo užduočių vertinimas leidžia įsivertinti paties vertinimo procesą, patikrinti, ar vertinimo užduotys sėkmingai diferencijuoja mokinius pagal jų rodomus įgūdžius.

Stufflebeam (2001) apibrėžia metavertinimą, kaip „procesą, kuriuo apibrėžiama, gaunama ir pritaikoma apibendrinanti informacija ir vertinanti informaciją apie įvertinimo naudingumą, galimybes, tinkamumą ir tikslumą, siekiant tuo procesu vadovautis atliekant vertinimą bei viešai informuojant apie vertinimo stipriąsias ir silpnąsias puses“ (Stufflebeam 2001). Kitaip tariant, dauguma specialistų žiūri į metavertinimą kaip į priemonę, užtikrinančią pirminio vertinimo kokybę, taip pat užtikrinančią, kad vertinimas būtų vykdomas laikantis atitinkamų profesinių standartų (Huang S. 2010).

Toliau pateiktos schemas (1.21 ir 1.22 pav.) rodo galimą skrydžių vertinimo eigą bei piloto skrydžio vertinimo struktūrą. Vertinti reikalingi atitinkamo orlaivio, kuriuo bus vykdomas vertinamas skrydis, modelis, taip pat piloto modelis, apibrėžiantis pilotui keliamus reikalavimus, ir vertinimo modelis, kuris nustato procesą, kuriuo turėtų būti atliekamas vertinimas. Turint tokią struktūrą, vykdomi praktiniai skrydžiai pagal konkrečias pilotui apibrėžtas ir jo vertintojui žinomas užduotis, vėliau įvertinamas paties vykdyto vertinimo

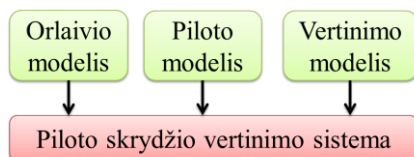
tinkamumas, atitiktis nustatytoms procedūroms ir, jei nebuvo pažeisti procesai, instruktorius gali priimti galutinį vertinimą.



1.21 pav. Skrydžių vertinimo eiga

Fig. 1.21. Sequence of flight assessment

Objektyviam piloto vertinimui turi būti suteikta galimybė skristi, atpažinti ir spręsti kilusias pavojingas situacijas. Šis metodas leidžia pakartotinai tikrinti piloto gabumus tada, kai pradeda vystytis pavojinga situacija. Bandymai gali būti vykdomi su kompiuteriniu skrydžio treniruokliu, kuris leidžia kurti scenarijus, privedančius prie avarijų. Rinkoje yra įvairių treniruoklių su skirtingais sudėtingumo lygmenimis. Itin tinkami yra realaus skrydžio treniruokliai (Thöndel 2011) su integruota piloto judesių sekimo sistema (Bruna 2012), kuri grąžina treniruoklio platformą atgal į pradinę padėtį, pilotui pajutus treniruoklio platformos judesį (Paces 2013).



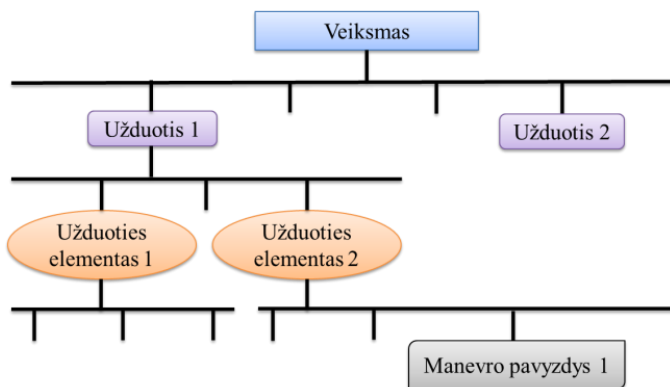
1.22 pav. Piloto skrydžio vertinimo struktūra

Fig. 1.22. Structure of pilot flight assessment

Paces (2013a) aprašo dviejų dalių užduotį, norint įvertinti piloto gebėjimus orientuotis pavojingose situacijose. Į metodą įtrauktos dvi užduotys iš (Paces 2013a). Pirma užduotis įvertina piloto gebėjimą nustatyti galimai pavojingas situacijas, pvz., užduotimi nustatoma piloto reakcija imituojamame skrydyje. Šioje užduotyje, pilotas mato imituojamą skrydžio vaizdą, kuriame stebi rodomą scenarijų. Kai pilotas yra išstudijavęs buvusių avarijų duomenų bazę, egzaminuotojo užduotis yra pažymėti momentus, kuriuose parodytame scenarijuje pilotas padarė skrydžio klaidas, kurios galimai galėjo sukelti avarijas (Thöndel 2012). Antroji užduotis įvertina piloto gebėjimą atlikti bendrus manevrus, pvz., pakilimas, skrydis maršrutu, artėjimas tūpti ir tūpimas, kur pilotavimo gabumų tikslumas nustatomas kartu su ribiniais pažeidimais (Paces 2013b).

Pirmosios užduoties tikslas – pagerinti piloto suvokimą apie orlaivio padėtį ir supratimą apie galimus rezultatus, jeigu skrydyje vykdomi skirtingi manevrai. Antroji užduotis – suprantama kaip pasirošimas realiam skrydžiui su

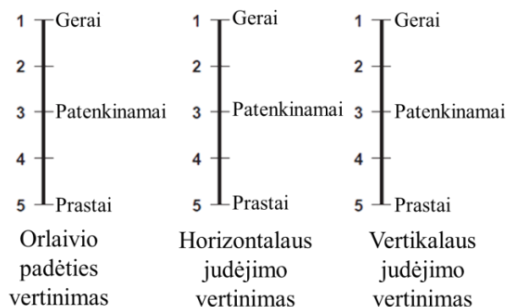
specialiomis funkcijomis, kurios geba įvertinti atliktą skrydį. Pirmoji užduotis padidina skrydžio saugą, o antroji sumažina mokymo išlaidas (Paces 2013b).



1.23 pav. Skrydžio užduočių hierarchija (AMCOM 2000)

Fig. 1.23. Flying task hierarchy (AMCOM 2000)

1.23 paveiksle parodyta panaši į Paces (2013b) pateiktą užduočių sistemą. Taip pat pabrėžiama, kad sistemą turėtų sudaryti kelios užduotys, kurių viena yra labiau kontrolinė, skirta pasirengti vertinimui, o kita jau yra skirta vertinimui įgyvendinti.



1.24 pav. Vaizdo ribų vertinimo skalė (AMCOM 2000)

Fig. 1.24. Visual cue rating scale (AMCOM 2000)

Polinkio, posvyrio, pokrypio padėtis ir šoninės-išilginės, ir vertikalaus judėjimo vertinimo skalė padeda įvertinti stabilizavimo efektyvumą (1.24 pav.) pagal šiuos apibrėžimus (AMCOM 2000):

- geras – kai pasitikėdamas pilotas gali atlikti staigius ir tikslus judesius gaudamas gerą skrydžio tikslumą;
- pakankamas – kai pasitikėdamas gali atlikti ribotus taisymus, o tikslumas yra pakankamas;

- prastas – galimi tik maži ir nesmarkūs pataisymai, o reikalingas tikslumas nepasiekiamas.

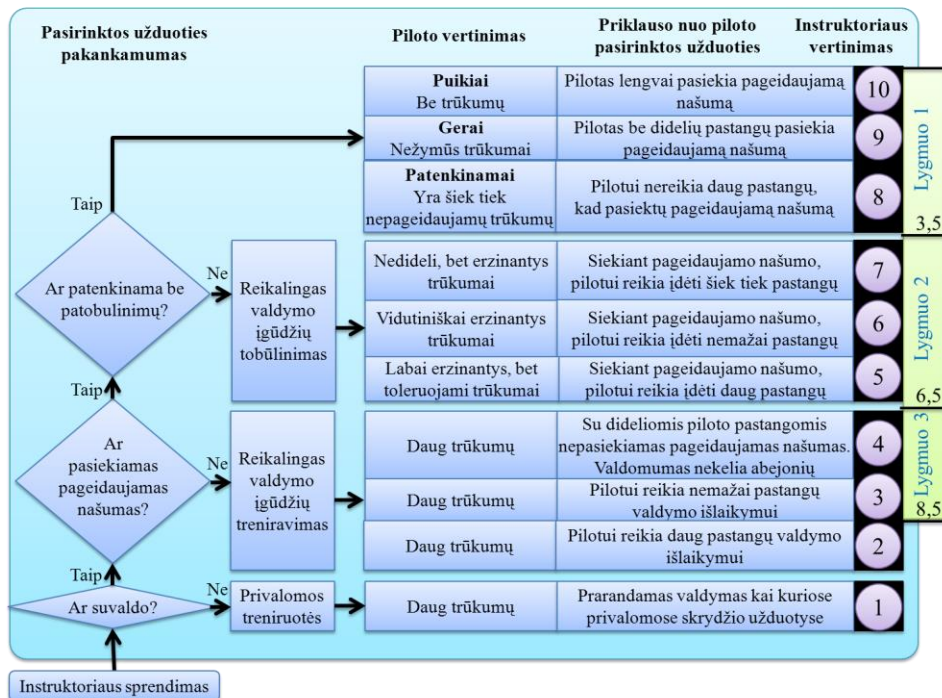
Turint omenyje, kad dėl piloto ir orlaivio sąveikos orlaivio charakteristikos neturi būti atskirtos nuo piloto veiksmų valdymo charakteristikų, remiantis Kuperio-Harperio orlaivio valdymo charakteristikų vertinimo skale (B priedas) (AMCOM 2000), 1.25 paveiksle siūloma disertacijos autoriaus sudaryta atitinkama piloto vertinimo skalė. Joje naudojama mūsų vertinimo sistemoms įprasta dešimtbalė sistema, kuri tiek vertinamiems, tiek vertinantiems turėtų būti lengvai suvokiama ir paprasta naudoti. Tokia skalė galėtų būti naudojama skrydžio vykdymo metu pirminiam įvertinimui, kol dar nėra įmanoma apžvelgti visų tikslų duomenų apie įvykdytos užduoties atlikimą.

Panašią skalę su įsivertinimo algoritmu orlaivio valdymo kokybei įvertinti siūlo ir Dolega (2008). Norint sukurti valdymo sistemą, kuri keičia orlaivio valdymo kokybę, turėtų būti kažkas, kas leidžia tai įvertinti. Dauguma taikomų metodikų aprašo, kaip išmatuoti ir įvertinti lėktuvo valdymo ypatumus. Dalis metodikų naudoja subjektyvius pilotų įspūdžius klasifikuojant lėktuvus (pvz., Kuperio-Harperio skalė (B priedas)). Tačiau šiuos būdus gali būti gana sunku pritaikyti, kai neprofesionalūs pilotai vertina lėktuvo valdymo ypatumus, nes jie ne visiškai teisingai supranta skrydžio elementus, kurie yra aprašyti Kuperio-Harperio skalėje. Tyrimo metu buvo nustatyta, kad jiems buvo gana didelė problema tiksliai klasifikuoti lėktuvo valdymo ypatumus (Dolega 2008).

Medicinos, ergonomikos ir kitų krypčių moksliniuose straipsniuose aprašoma, kaip išmatuoti piloto apkrovą. Tačiau šie metodai nėra galimi arba yra pernelyg sudėtingi naudoti mažo orlaivio skrydyje. Todėl būtina nustatyti, galbūt mažiau tikslesnius, bet paprastesnius kriterijus. Pasiūlyti kriterijai taip pat turi leisti įvertinti orlaivio, kuris neaprūpintas specializuotais prietaisais, valdymo ypatumus, naudojant tik vidinius valdymo sistemos elementus. Be to, visi matavimai turi būti atlikti įprastomis orlaivio eksploatacijos sąlygomis (Dolega 2008).

Visos pilotų suformuotos nuomonės, pareiškimai ir pastabos apie lėktuvo valdymo ypatumus buvo surinktos ir analizuojamos. Galiausiai, buvo galima apibrėžti svarbesnius skrydžio elementus, kurie turi įtakos pilotų nuomonei apie išbandyto lėktuvo skrydžio charakteristikas. Svarbiausias elementas, į kurį buvo kreipiamas dėmesys, yra tai, ar pilotai gebėjo sąmoningai išlaikyti tinkamą lėktuvo padėtį. Be to, jie atkreipia dėmesį į tai, kiek jų pastangų pareikalavo privalomo veiksmo padėties stabilizavimas. Pilotai kreipė mažiau dėmesio į apibrėžtų skrydžio parametrų tikslumo valdymą. Kai buvo baigtas orlaivio vertinimo procesas, pilotai bandė įvertinti, ar visos lėktuvo reakcijos į atliktus veiksmus atitiko jų ketinimus (Dolega 2008).

Pilotai skrisdami orlaiviu suvokia, kad jo valdymas yra skirstomas į smulkesnes užduotis. Galima pastebėti, kad skirtingų įgūdžių turintys pilotai jas skrydžio metu skirsto į skirtingas hierarchijas (Dolega 2008).



1.25 pav. Piloto veiksmų vertinimo skalė

Fig. 1.25. Pilot action assessment scale

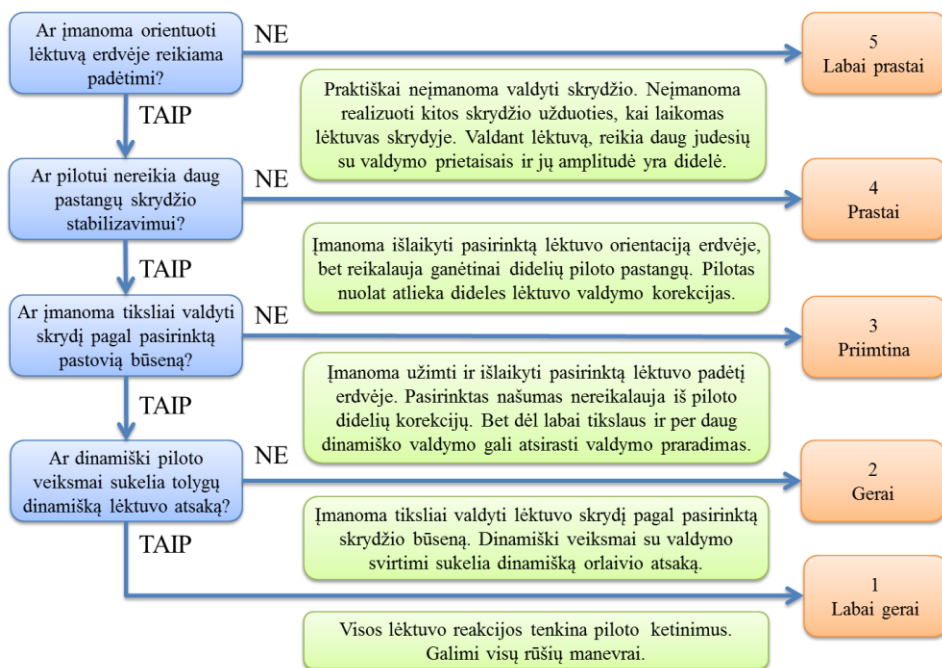
Neprofesionalūs pilotai visą savo veiklą nukreipia į nurodytų skrydžio parametrų išlaikymą. Dažniausiai aukštis ir kursas yra įprastiniai parametrai, kuriuos skrydyje reikia išlaikyti tarp nurodytų praskridimo taškų. Jie mažiau dėmesio skiria lėktuvo padėties stabilizavimui, neatsižvelgia į valdymo savybes, todėl jų valdymas kartais tampa labai dinamiškas ir net agresyvus. Kitokiomis savybėmis pasižymi profesionalūs pilotai. Jiems svarbiausia stabilizuoti lėktuvo padėtį naudojant minimalias valdymo pastangas. Jiems priimtini didesni, bet vis dar saugūs kurso ir aukščio nuokrypiai (Dolega 2008).

Pagal Dolega (2008) gautus rezultatus, lengvojo bendrosios paskirties orlaivio valdymo sistema skirta nepatyrusiems pilotams vertinti, kuri turi atsižvelgti į pilotų specifinį požiūrį į orlaivio valdymą (Dolega 2008). Taigi, remiantis pilotų nuomone, buvo sukurta skalė, kuri atsižvelgia į specifines nepatyrusių pilotų problemas. Sudarytoje skalėje klasifikuoti lėktuvų valdymo

ypatumai į penkis lygmenis: 5 – labai prastai; 4 – prastai; 3 – priimtina; 2 – gerai; ir 1 – labai gerai (Dolega 2008).

Šis vertinimas pavadintas mokymo kurso vertinimo skale. Pateikta mokymo kurso skalė turi trečią balą (3 – priimtina), kur aprašyta tvarka suderinta orlaivio valdymo kokybė nustatyta kaip neutrali (Dolega 2008).

Tiek siekiant palengvinti vertinimo procesą, tiek užkirsti kelią per didelei piloto savivalei, pasiūlytas specialus apsisprendimo algoritmas (1.26 pav.). Taip pat 1.30 paveiksle pateikti kiekvieno valdymo kokybės lygio trumpi aprašymai, kurie padeda pilotui vertinimo metu (Dolega 2008).



1.26 pav. Mokymo kurso vertinimo skalė ir sprendimų algoritmas (Dolega 2008)

Fig. 1.26. Training rate evaluation scale and decision algorithm (Dolega 2008)

Lengvųjų bendrosios paskirties orlaivių valdymo ypatumų įvertinimo algoritmas, pateiktas 1.26 paveiksle ir yra pagrįstas subjektyvia pilotų apklausa. Kitas Dolega (2008) pasiūlytas metodas, pagal orlaivio valdymo kokybę, naudoja objektyvią analizę: tiek lėktuvo skrydžio parametrus, tiek pilotų veiksmus. Ši metodologija sujungia du elementus: lėktuvo skrydžio parametrus ir piloto darbo krūvį (pastangas), kuris būtinas išlaikyti nurodytus manevrus.

Galiausiai, rastas santykis tarp pilotui reikalingų pastangų atlikti reikiamus manevrus ir valdymo prietaiso judesių skaičiaus ir pobūdžio (pvz., vairalazdė,

šoninė vairalazdė arba vairs). Valdymo prietaiso judesių skaičius per laiko tarpą ir jų amplitudė gali apytiksliai apibūdinti piloto pastangas (Dolega 2008).

Tokios reikiamų pastangų lygiu besiremiančios vertinimo skalės gali būti naudojamos kaip pirminė vertinimo priemonė. Jos nereikalauja papildomų išteklių ar prietaisų, o tik pasiūlo kitokį kriterijais paremtą vertinimo pateikimą, kuris galbūt paprastesnis naudoti tiek vertinančiam instruktoriui, tiek lengviau suprantamas mokiniui, kuris, remdamasis tokia skale, net galėtų bandyti pats įsivertinti. Nuo tokių skalių naudojimo, pridėjus konkrečių skrydžio parametrų duomenis, galima prieiti ir prie modeliais pagrįsto užduočių vertinimo.

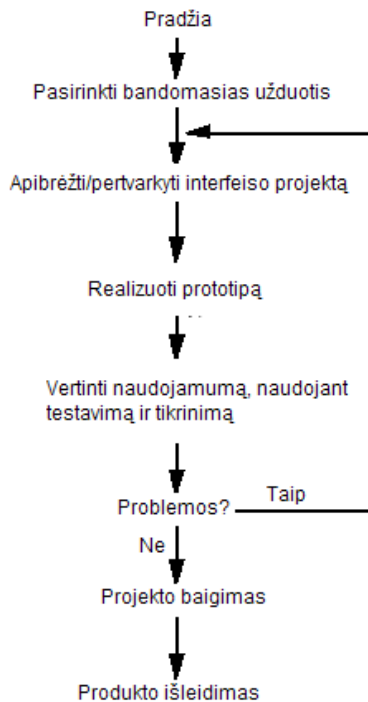
1.5. Modeliais pagrįstas vertinimas

Didėjant orlaivių srautui, didinamas ir orlaivių skrydžių tankis oro erdvėje, todėl griežtėja ir navigacijos reikalavimai. Tuo pačiu daugiau dėmesio reikia skirti pilotų rengimui ir jų atitinkamam vertinimui. Skrydžio vertinimui reikalingos rimtesnės priemonės, kurios gebėtų atlikti savo užduotį geriau, negu tai galėtų atlikti vien tik skrydžio instruktorius. Tam net keletas šaltinių siūlo modeliais paremtą piloto skrydžio vykdymo vertinimą, kuris remtųsi sudarytu išankstiniu modelių besinaudojančiomis automatinėmis sistemomis. 1.27 paveiksle parodytas modelių paremtos sistemos kūrimo algoritmas, kuriame pateiktos kūrimo modelio sudarymo stadijos.

Algoritmas nurodo, kad iš pradžių apsisprendžiama kas turi būti vertinama ir kokiais kriterijais, pagal tai parengiamos bandomosios užduotys ir jų vykdymo scenarijai. Po to užduotys bandomos, kad matytųsi, ar vertinami tie gebėjimai, kurie ir buvo suplanuoti. Taip pat ar vertinamasis supranta, ko reikalauja sudarytos užduoties vykdymas – vykdomas metavertinimas. Po sėkmingo metavertinimo jau galima spręsti ar modelis taikytinas numatytam vertinimui.

Užduoties analizė nereikalauja sudaryti užduoties vykdymo strategijos. Piloto užduoties atlikimą lemia: užduoties loginiai reikalavimai; piloto pažinimo architektūra – pagrindinis mechanizmas, kuriuo parenkama elgsena; ir konkreti strategija atliekant užduotį – atsižvelgiant į užduočių atlikimo reikalavimus ir architektūrą, kas turėtų būti atlikta, kokia tvarka ir koku laiku norint užbaigti užduotį.

Taigi, kad būtų galima sudaryti užduoties atlikimo modelį, iš pradžių būtina suprasti užduotį, tuomet pasirinkti architektūrą, o vėliau pasirinkti strategiją, kuri nurodys, kaip bus naudojama architektūra, atliekant užduotį. Šios strategijos nustatymas yra kritinė sąlyga modelio sudarymui (Kieras 2009). Toliau bus aptariami literatūroje apibūdinti skrydžio trajektorijų tikslumo išlaikymo ir piloto skrydžių vykdymo modeliai.



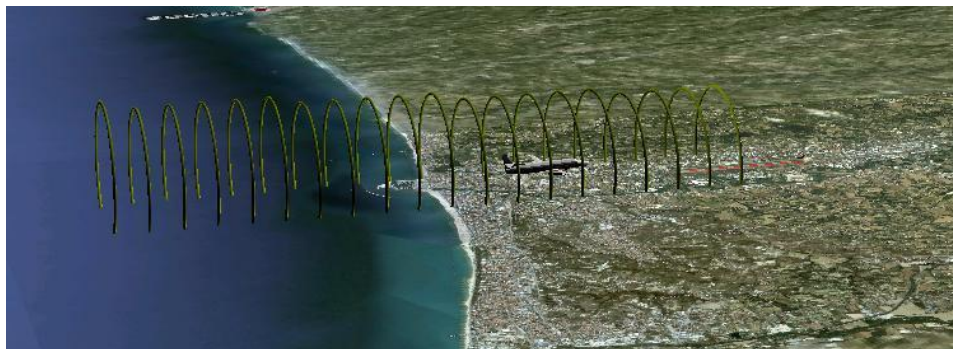
1.27 pav. Modeliu pagrįsto vertinimo kūrimo algoritmas (Kieras 2009)

Fig. 1.27. Algorithm implementation for model-based evaluation (Kieras 2009)

Savičienės skrydžio trajektorijos tikslumo vertinimo modeliais paremti tyrimai sutelkti ties metodu, kuriuo modeliuojami ir vizualizuojami norminių taisyklių pažeidimai sprendimų paramai orlaivio atvykimo-išvykimo etapuose. Konceptinė sistema sukurta siekiant įrodyti siūlomo metodo pritaikomumą. Normos yra paimtos iš skrydžių taisyklių, žemėlapių, atvykimo-išvykimo procedūrų schemų ir kitų teisinių dokumentų. Normatyvinės taisyklės pavyzdys: „Išlaikyti 3° nuolydžio kampą tupiant ir laikytis aukščio, ir geografinių apribojimų, kurie parodyti aerodromo schemeje“. Tyrimas apsiriboja ties normomis, kurios taikomos skrydžio atvykimo ir išvykimo etapuose. Darbas yra pagrįstas prielaida, kad lidaras, kuris naudojamas kartu su radaru, nustato orlaivio padėtį dideliu tikslumu. Tai leidžia apsisprendimų paramos sistemai (APS) nustatyti trajektorijos pažeidimus (Savičienė 2012; Savičienė 2011).

Siūlomas pažeidimų norminio modeliavimo ir vizualizavimo elgsenos metodas. Norminės taisyklės vaizduoja rizikos elementus, kurie apibrėžti APS sistemoje. Šis darbas siūlo pažeidimo sąvokos apibrėžimą APS sistemoje. Rizikos apibrėžimą sieja modeliuojama norma su slenksčių rinkiniu ir išskirtais rizikos lygiais. Kiekvienas rizikos lygis yra susietas su viena šviesoforo šviesos

spalva, ir tai padeda skrydžio vadovui priimti sprendimus. Rizika yra parodoma spalvotame rodiklyje APS sistemos valdymo skydelyje. Lidaro APS sistemai buvo pritaikytos naujos vaizdavimo idėjos iš kitų projektų. Tokiu būdu, orlaivio oro uosto procedūrų laikymosi vizualizavimui buvo pasiūlyti du metodai, kurie paremti 3D vaizdu. Papildomi objektai (projekcijų ribos, skrydžio trajektorijos žiedai) yra integruoti į pagrindinį 3D langą (1.28 pav.), kurie leidžia vartotojui vizualiai įvertinti procedūrų laikymąsi (Savičienė 2012).



1.28 pav. Tinkamo orlaivio tūpimo demonstracija grynajame 3D modelyje (Savičienė 2012)

Fig. 1.28. Demonstration of the correct aircraft landing in pure 3D prototype (Savičienė 2012)

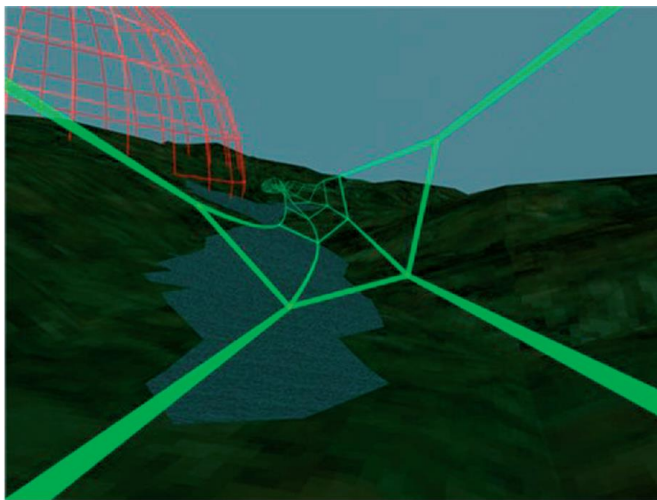
Savičienė aptarė 2D ir 3D orlaivio skrydžio vaizdavimo metodų privalumus ir trūkumus. Žmogus geriau suvokia skrydžio nuokrypius sistemoje, kai pateikiami dvimatėje plokštumoje (Savičienė 2009).

Liekamosios trajektorijos. Senesniuose radarų ekranuose lėktuvo pozicija buvo vaizduojama tašku, o atsiradus naujam radaro rodmeniui ekrane likdavo nykstantys ankstesniųjų pėdsakai. Pagal šiuos pėdsakus skrydžių vadovai vertindavo lėktuvo kryptį ir greitį (Wong 2007). Sistema naudotojams priimtinesnė, jei vaizduojamos lėktuvų liekamosios trajektorijos. Jos gali būti vaizduojamos ir ištisinėmis kreivėmis (Lange 2003; Savičienė 2009).

Prognozuojamos trajektorijos. Sprendimų priėmimo sistema numato orlaivių trajektorijas iki tam tikro laiko ateityje. Apžvelgtuose pavyzdžiuose numatoma trajektorija vaizduojama atkarpa, prasidedančia orlaivio dabartinėje padėtyje ir perbraižoma kiekvieną kartą, kai gaunami nauji duomenys apie orlaivio padėtį. Patariama vaizduoti netikrą orlaivį (angl. *Ghost*) tikrojo orlaivio priekyje (Savičienė 2009).

Orlaivio trajektorijų ribojimai. Orlaivio trajektorijos ribojimai tūpimo procedūroje (1.29 pav.) sudaro sudėtingą aprašą. Šios žinios išreiškiamos ne „vartų“ (aukštis \times plotis), ir ne „piltuvėlio“ (atstumas \times nuokrypio kampas)

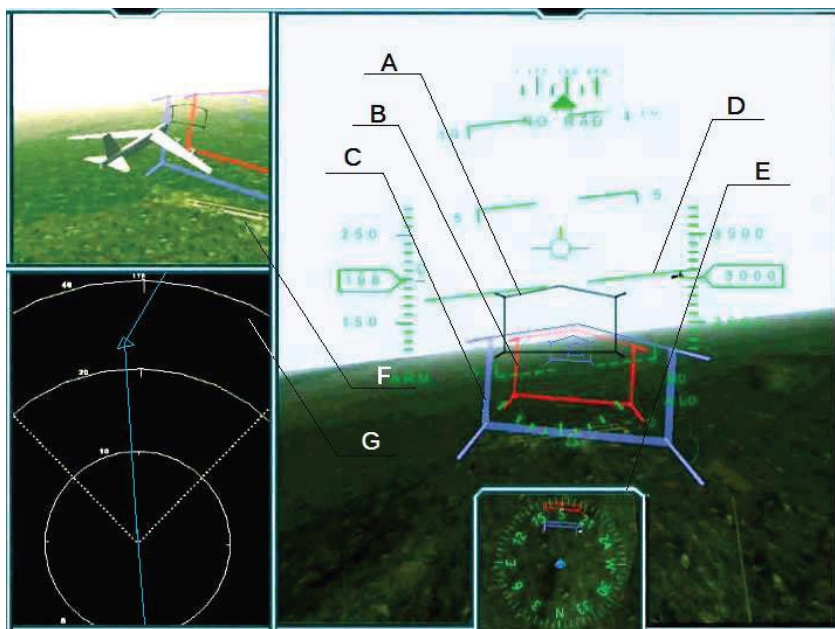
forma, o jų seka. Be to, tūpimo procedūrų yra kelios, atsižvelgiant į orlaivio ir oro uosto įrangą, oro sąlygas (pvz., matomumą). Dalis tūpimo procedūros reikalavimų yra rodomi šoninėje projekcijoje (angl. *Profile view*). Šie tupiančio orlaivio trajektorijos ribojimai vaizduojami 2D projekcijoje – „sienoje“. Procedūroje pavaizduotas „profilis“ yra ilgas (kai kuriose procedūrose – daugiau kaip 10 jūrmylių). Vaizduojant jį realiomis proporcijomis, vaizdas taptų per smulkus, todėl nenaudingas. Sudarytoje sistemoje trajektorijų ribojimai vaizduojami atskiruose fragmentuose (t. y. be galimybės pamatyti visą kontekstą) arba iškraipant vaizdą. Toks iškraipymas gali būti įvertintas nepalankiai (Rozzi 2007; Savičienė 2009).



1.29 pav. Tunelio rodymas ekrane su pažymėta grėsmės zona (Collinson 2011)

Fig. 1.29. „Pathway in the sky“ pictorial display with indicates threat zone (Collinson 2011)

Žemės paviršiaus (topografija). 3D vaizdavimo pranašumas yra vaizdus lėktuvo aukščio nuo žemės paviršiaus parodymas (Rozzi 2007). Kita vertus, yra šaltinių, teigiančių, kad žemės paviršiaus vaizdavimas 3D neteikia papildomos informacijos ir reljefą galima vaizduoti spalvomis – kaip geografiniuose žemėlapiuose (Lange 2003). Oro uostai, kurių duomenys naudojami „SKY-Scanner“ projekte, yra šalia kalnų, todėl svarbu tiksliai vaizduoti žemės paviršių. Išbandytas apibendrintas ir fotorealistiškas reljefo modelis. Tačiau, kaip parodė tyrimai, fotorealistiškumas gali per daug blaškyti dėmesį (Amaldi 2005; Savičienė 2009). Savičienės aprašytame modelyje riboms vaizduoti sudaromi skrydžio tuneliai. Tunelių sudarymas galėtų būti naudojamas ir vaizduojant įvertinimo lygius pilotų vertinimo sistemoje.



1.30 pav. Pilotų kabinos ekrano vertinimo sąsaja (Huang 2010)

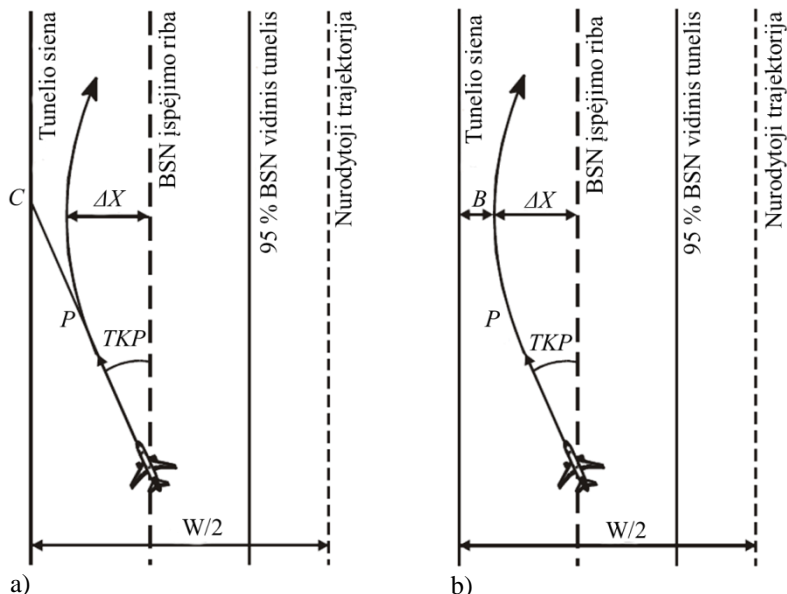
Fig. 1.30. Cockpit display evaluation interface (Huang 2010)

Tunelių sudarymo metodai. Skrydžio tunelis yra virtuali trajektorija, parodanti skrydžio kelią pilotų kabinos vaizdo sistemoje (1.30 pav.). Ji padidina pilotų erdvinį suvokimą ir palengvina skrydžio būsenos supratimą. Gali būti sudaromas arba statinis, arba dinaminis skrydžio tunelis. Statiniame tunelyje, sistemoje objektai iš anksto nustatomi pagal maršruto taškus. Pagal šį metodą, duomenys gali būti apskaičiuojami iš anksto, todėl skrydžio metu naudojami santykinai maži skaičiavimo resursai. Taip pat, tunelio trajektorijos vaizdavimas nesikeičia ir atitinka iš anksto apibrėžtus duomenis. Tokia skrydžio tunelio konstrukcija yra nelanksti ir negali prisitaikyti prie aplinkos pokyčių. Be to, atsiradus dideliame skrydžio nuokrypiui, pirminis skrydžio tunelio vaizdavimas dingsta iš pilotų kabinos ekrano ir vaizdavimo sistema daugiau nebeteikia pilotui būtinos orlaivio vedimo informacijos, kuri padėtų pilotui sugrįžti į paskirtąjį maršrutą, ir todėl prastėja piloto padėties suvokimas (Huang 2010; Beringer 2000).

Taikant dinaminį skrydžio tunelio metodą, pilotas gali atnaujinti dinaminį tunelį, kai labai nukrypus nuo paskirto skrydžio maršruto, sukuriamas naujas skrydžio tunelis, kuris ves pilotą atgal į nurodytą maršrutą. Huang (2010) siūlo taikyti būtent dinaminio skrydžio tunelio sudarymo metodą. Skrydžio duomenims apskaičiuoti naudojamos dvi sistemos: apskaičiuojant skrydžio

būseną vertinimo sistema taiko dinaminio modelio tiesinę aproksimaciją, o prognozavimo sistema naudoja realaus laiko modelį, kuris sumodeliuoja reikiamą skrydžio maršrutą.

Huang (2010) sukonstravo pilotų kabinos įvertinimo koncepcinę sąsają (1.30 pav.), kurioje A – apskaičiuotas skrydžio vektorius, B – prognozuojamas skrydžio vektorius, C – tunelio elementai, D – pirminio skrydžio vaizduoklio (angl. *PFD* – *Primary flight display*) informacija, E – girokompaso vaizdas, F – egzocentrinis vaizdas, G – navigacijos vaizdas.



1.31 pav. Du būdai nustatyti tunelio slenksčio bendrąją sistemos nuokrypį: naudojant fiksuotą laikinąją ribą arba fiksuotą apsauginę ribą (Ober 1998)

Fig. 1.31. Two methods to determine the tunnel incident alarm total system error threshold: by using a fixed temporal margin or a fixed spatial buffer (Ober 1998)

Norint, kad pilotas lengviau valdytų orlaivį skrydžio tunelyje, jo trajektoriją turi sudaryti glotnios kreivės (Huang 2010).

Ober (1998) tyrė svarbų įspėjimo mechanizmą ir laiką, kuris nėra originali RNP reikalavimų dalis, Pagrindinis dėmesys sutelkiamas į laiko svarbą susiejant tunelio įvykių įspėjimus (1.31 pav.), kuriuos apibrėžia RNP reikalavimai. Kol daugiausia dėmesio skiriama horizontaliai navigacijai ir skrydžio tiesiuose segmentuose, pažymėtina, kad būtų naudinga išplėsti reikalavimus vertikaliuose plokštumoje ir netiesiuose skrydžio segmentuose. Taip pat gali būti einama link visiškai 4D naudojančios navigacijos (Ober 1998).

Prie 4D trajektorijų yra priskiriami orlaivio padėtis, aukštis, greitis, kilimo-žemėjimo greitis, laikas ir kiti skrydžio parametrai, o jo erdvinės figūros gali būti sudarytos taikant dirbtinius antžeminius kelius ir skrydžio profilius (Chao 2010).

Paklaidų vertinimas. Analizuojant trajektorijų išlaikymo įgūdžius vykdant skrydį, turi būti sukurta paklaidų vertinimo sistema, kuri vertintų kada skrydžio paklaidos yra didesnės nei reikalavimuose ar užduotyje leidžiama, Visų pirma, taiklumą apibrėžia bendrasis sistemos nuokrypis (BSN) (angl. *TSE – Total system error*). BSN sudaro skrydžio techninis nuokrypis (STN) (angl. *FTE – Flight technical error*), kuri gali būti išmatuota, ir navigacijos sistemos nuokrypis (NSN) (angl. *NSE – Navigation system error*), kuri gali būti įvertinta (Ober 1998).

Norint sumažinti BSN nuokrypio viršijimo tikimybę, pagal RNP reikalavimus, sistema įspėja avariniu nuokrypio signalu tunelyje. Tunelio nuokrypio signalas įspėja, kad orlaivis gali nukrypti iš nurodyto skrydžio tunelio dėl (Ober 1998):

- gedimų, viršijančių BSN paklaidas;
- orlaivio gedimų;
- piloto klaidų;
- aplinkos reiškinių.

Todėl pilotas turi pakankamai laiko reaguoti į signalą ir išlaikyti tinkamą saugumo lygį. Tai reiškia, kad piloto valdomas orlaivis, skrisdamas maršrutu, gali išlaikyti orlaivį tunelio viduje. Aerodromo prieigose turi būti pakankamai laiko, kad būtų atliktas saugus perėjimas į nutraukto tūpimo tvarką (angl. *MAP – Missed approach procedure*) (Ober 1998). Tunelio įspėjimo signalas yra naudingas tik tada, kai yra pakankamai laiko atitinkamai sureaguoti (Ober 1998).

Kai orlaivio trajektorija nesutampa su nurodyta trajektorija, padėties nuokrypis didės greičiu, kuris priklausys nuo trajektorijos nuokrypio kampo vertės. Kai padėties nuokrypis viršija BSN ribą, tuomet pradedamas generuoti įspėjimo signalas. Pilotas turi imtis orlaivio padėties patikslinamųjų veiksmų, kad jį sugrąžintų į nurodytą trajektoriją (Ober 1998).

Tačiau orlaivio padėties nuokrypis vis tiek didės, jei orlaivio kryptis nebus pakankamai suderinta. Didžiausias padėties nuokrypis yra funkcija, kurią sudaro trajektorijos kampo paklaida, greitis, reakcijos laikas ir patikslinamųjų veiksmų vertė. Jeigu pilotas, koreguodamas skrydžio trajektoriją, reaguoja kiek įmanoma greičiau, kad sugrąžintų orlaivį į nurodytą trajektoriją, tuomet didžiausias padėties nuokrypis kinta priklausomai nuo šių kintamųjų (Ober 1998):

- greičio;
- padėties kampo nuokrypio;
- leidžiamo didžiausio orlaivio posvyrio kampo.

Fiksuota laikinoji riba – vienas iš būdų, kuris gali būti naudojamas, nustatant BSN slenkstį. Jei nebus atliekami jokie veiksmai, orlaiviui priartėjus prie fiksuotos laikinosios ribos bus pasiekta tunelio siena (1.31 pav. a, taškas C). Ši fiksuota laikinoji riba turėtų susidėti iš minimalaus reakcijos laiko T_R ir laiko, kurio reikia patikslinti orlaivio kursą T_C . Kadangi didžiausia padėties nuokrypis po patikslinimo veiksmo yra greičio, trajektorijos kampo nuokrypos ir didžiausio orlaivio posvyrio kampo funkcija, pagal T_C turėtų būti nustatoma blogiausio atvejo situacija (Ober 1998).

Fiksuota erdvinė apsauginė riba – tai ankstesnio būdo praplėtimas apskaičiuojant T_C , o ne pasirenkant blogiausio atvejo situaciją. Tokiu atveju nustatyti slenkstį galima įvertinus papildomą padėties nuokrypį ΔX , kuris atsiranda po to, kai pilotas atlieka korekcinius veiksmus, o ne pagal orlaivio kursą T_C . 1.31 paveiksle iliustruojama ši idėja. Taikant fiksuoto posvyrio kampo prielaidą, ši papildomas nuokrypis gali būti nustatomas aproksimacijos būdu pagal:

$$\Delta X = v \cdot T_R \cdot \sin(TKP) + \frac{v^2(1-\cos(KKP))}{g \cdot \operatorname{tg}(\varphi)}, \quad (1.8)$$

čia v – orlaivio greitis; T_R – reakcijos laikas, reikalingas pilotui pradėti posūkį; TKP – trajektorijos kampo paklaida tuo momentu, kai pasiekiamas BSE slenkstis; φ – posvyrio kampas korekciname posūkyje (Ober 1998).

Nustatant fiksuotą erdvinę apsauginę ribą B , BSN padėties nuokrypio slenkstis. $BSN_{\text{įspėjimo}}$ apskaičiuojamas taip:

$$BSN_{\text{įspėjimo}} = \frac{W}{2} - B - \Delta X, \quad (1.9)$$

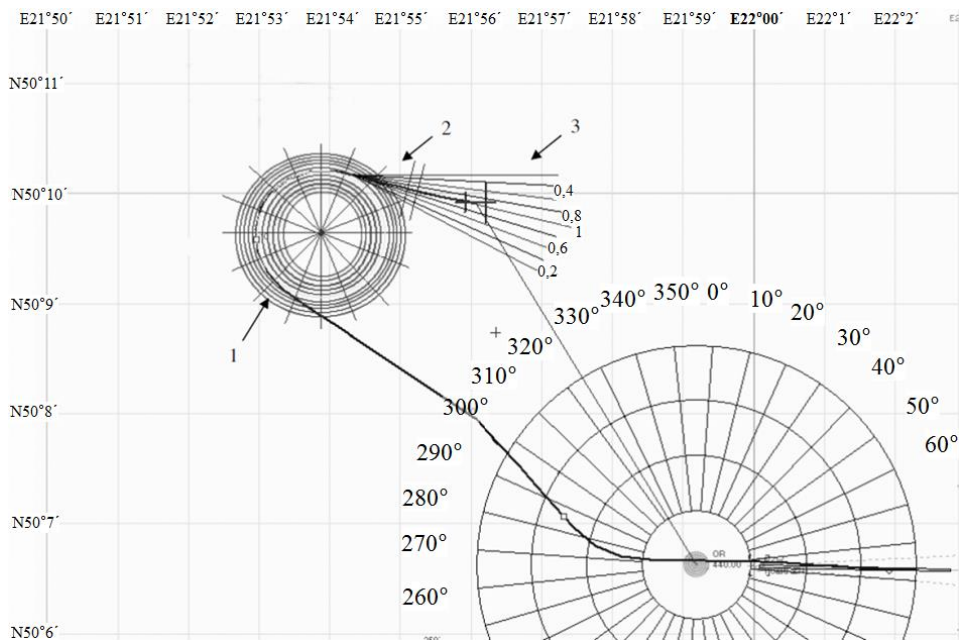
čia W – tunelio plotis.

Taigi galima sudaryti tunelius, už kurių išskridus orlaiviui būtų matuojamos nuokrypių paklaidos ir pagal jas įvertinamas viso skrydžio vykdymas.

Treniruočių vertinimo metodas. Prieš tai aptartas Savičienės modelis su skrydžio tuneliais, kuriais siūloma palengvinti profesionalių pilotų skrydžio vykdymą ir tik pateikia galimą idėją skrydžio vertinimui, Gruszecki siūlo modelį labiau pritaikytą mokymo vertinimui. Kiekvienas piloto veiksmas turėtų būti vertinamas pagal teisės aktus, kurie apibrėžia skrydžio parametrų priežiūros stebėjimo metodus. JAR – AWO reglamentas (JAR – visų oro sąlygų operacijos) vertinant piloto įgūdžius leidžia taikyti statistinius metodus (JAR 1996). Šis metodas paremtas Relėjaus skirstiniu. Tinkami ir leistini nuokrypiai tam tikrų skrydžio parametrų ir treniruočių lygmuo yra nurodyti JAR – FCL 1.210 (JAR – Skrydžio įgulos licencijavimas) reglamente (Gruszecki 2007; JAR 2002).

Metodas, kuris pateiktas treniruotėms įvertinti, remiasi statistinių verčių lentele. Pasirinktų kintamųjų nuokrypiai, susieti su tam tikro skrydžio užduotimi, yra priskirti statistinėms vertėms (diapazone nuo 0 iki 2). Nuokrypių priskyrimas

yra atliekamas naudojant kiekvienos užduoties šabloną. „Rate one“ užduoties šablono pavyzdys nurodo ir išlaiko norimą kursą, HDG 100 (angl. *Heading*), kuris pavaizduotas 1.32 paveiksle. Naudojantis šablonais, statistinių verčių lentelė, skrydžio parametrų didžiausiais nuokrypiais leidžiama tinkamai nubrėžti kreives (1.33 pav.). Tinkamos kreivės iliustruoja įrašytų nuokrypų sumą per treniruotę taip pat atsižvelgiant į bandymų skaičių (Gruszecki 2007).



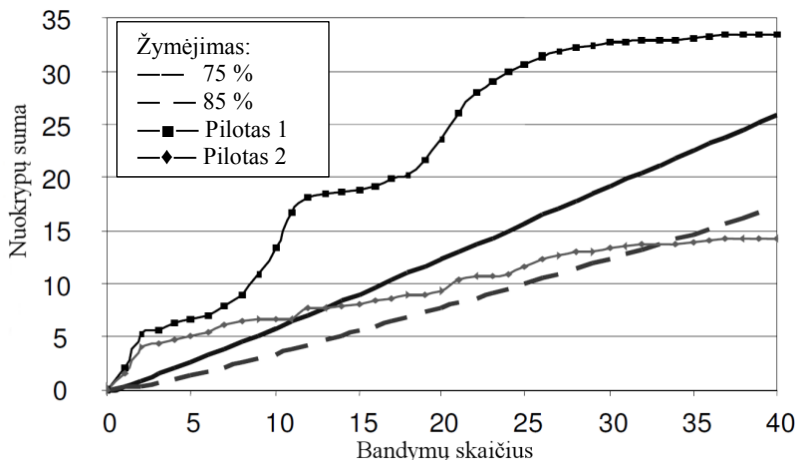
1.32 pav. Nuokrypių šablonas: 1 – pastovus posvyrio kampas; 2 – norimo kurso nustatymas (HDG 100); 3 – tikslaus ir pastovaus kurso išlaikymas (HDG 100) (Gruszecki 2007)

Fig. 1.32. Template of deviations: 1 – constant bank angle "rate one"; 2 – interception of desired heading (HDG 100); 3 – precision of maintaining constant heading (HDG 100) (Gruszecki 2007)

1.33 paveiksle pavaizduotas grafikas yra nubrėžtas su sąlyga, kad didžiausi nuokrypiai dera su Relėjaus skirstiniu (Gruszecki 2007).

Toliau apibrėžiama autonominė piloto vertinimo sistema. Modeliu paremtą autonominę piloto vertinimo sistemą (PVS), skirtą tinkamų kandidatų į pilotus (asmenų atranka, kurie pretenduoja tapti pilotais, jeigu atitiks numatytus pilotui keliamus reikalavimus) atrankai ir įvertinimui pristatė ir Shub (1994). Sistema įvertina ir analizuoja kandidatų veiksmų našumą imituojamose skrydžio sąlygose. Sistemos įvertinti įgūdžiai yra koreliuojami su tinkamo skrydžio mokymo reikalavimais. PVS suprojektuota ir sukurta grupės ekspertų, kuriuos

sudarė patyrę naikintuvų pilotai, psichologai, gydytojai, inžinieriai, skrydžio instruktoriai. Veiksmų našumo matavimai, esant dideliam darbo krūviui, tarnauja kaip pagrindas būsimų pilotų gebėjimų prognozavimui. Darbo krūvis yra apibrėžiamas kaip piloto krūvio paskyrimas, kuris susideda iš užduočių nurodytoje aplinkoje.



1.33 pav. Tinkamų kreivių pavyzdžiai (Gruszecki 2007)

Fig. 1.33. Example of curves of success (Gruszecki 2007)

PVS gali būti priderinta daugelyje sričių, kur reikalinga sudėtinga sistema pilotų atrankai. Šiose sistemose sudaroma įtampa ir per trumpą laiką pilotui numatyta reaguoti į sparčiai kintančias situacijas, kuriu metu stebimas ir vertinamas didelis duomenų kiekis. Kariniame pritaikyme, PVS gali tarnauti išankstinei kandidatų atrankai pilotų mokymams, taip pat pilotų tarpiniams testams iki jiems paskirtų specializuotų realių mokymų (pvz., naikintuvams, sraigtasparniams, transportiniams orlaiviams, lengviesiems orlaiviams ir kt.). PVS gali pakeisti patikrinimus ir testus esančius dabartinėse pilotų atrankose.

PVS gali pasiūlyti:

- kandidato veiksmų našumo kiekybinį prognozavimą, siekiant nustatyti asmens galimybes tapus pilotu mokiniu (asmuo, norintis gauti piloto licenciją) ir aktyviu pilotu (asmuo, kuris be didelių pertraukų valdo orlaivius);
- piloto veiksmų našumo kiekybinį prognozavimą tam tikram orlaivio tipui;
- kandidato arba piloto veiksmų našumo kiekybinį prognozavimą tam tikrame aplinkos ir taktinių sąlygų rinkinyje.

Šios sistemos programinę įrangą sudaro scenarijų kūrimas, analizės apibrėžimo, bandymo vykdymo, kandidato veiksmų našumo duomenų rinkimo, įvertinimo ir ataskaitos kūrimo dalys. Programinės įrangos paketas veikia, kaip paraiškos generatorius, kuris leidžia rengti ir keisti testus, ir analizes. Veikianti programinė įranga imituoja oras-oras užduotis realias sąlygas vaizduojančioje aplinkoje. Ji gali būti išplėsta su papildomais scenarijais pagal tam tikrus reikalavimus. Kandidato veiksmų našumo analizė remiasi kriterijais. Našumo analizė surenka kandidato našumo įrašus, atlieka analizę ir kvantavimą. Bandymas paleidžiamas dinamiškai ir nuolatos didinant piloto darbo krūvį. Kandidatas privalo reaguoti į scenarijus ir vykdyti užduotis, o sistema stebi kandidato sensomotorines ir protines reakcijas. Kandidato veiksmų našumas yra analizuojamas kiekviename etape.

Ateities naikintuvų pilotų sensomotorikos ir pažinimo reikalavimai tampa optimalios atrankos programos pagrindu, kurie įtraukti į įvairias užduotis. Šiuolaikiniai naikintuvų pilotai, skraidantys su didelio našumo orlaiviais, kurie aprūpinti sudėtinga ir reiklia įranga, susiduria su nuolat kintančiais iššūkiais. Kol sprendžiami sudėtingi scenarijai, pilotas naudoja didelius protinius išteklius (pvz., gebėjimus), skirsto savo išteklius visoms užduotims, ignoruodamas nesvarbią informaciją. Skrydžio metu, pilotas nuolatos perskirsto savo dėmesio išteklius. Todėl potencialaus piloto vertinimas realioje aplinkoje tarnauja kaip našus pagrindas atrankoms atlikti. Taip pat vertinami kandidato pagrindiniai sensomotorikos gebėjimai. Intensyvaus darbo krūvio matavimuose, naudojamas būsimų pilotų dėmesio sutelkimo galimybių prognozavimas.

PVS sistemoje visos scenarijaus komandos priimanamos ir vykdomos piloto kabinoje. Visi ryšio, valdymo ir vaizdavimo prietaisai taip pat yra pilotų kabinoje.

Išoriniai prietaisai atsako į sistemos įvesties signalus. Vairalazdė valdo imituojamą orlaivį. Traukos svirtis valdo imituojamo variklio trauką. Stereo ausinės groja scenarijaus garsus ir komandas. Radaro vaizduoklis parodo orlaivių duomenis, orlaivį ir taikinio duomenis (aukštį, greitį ir atstumą) bei skrydžio komandas.

Instruktoriaus kompiuteris leidžia nurodyti ir parinkti scenarijus, bei apibrėžti ir aktyvuoti poskrydinę analizę. Kompiuteris konvertuoja analoginius įvesties įrenginių duomenis į skaitmeninį formatą tolimesniam apdorojimui. Kompiuteris apdoroja duomenis, kad gautų galutinius našumo įvertinimo rezultatus.

Nuo PVS sistemos programinės įrangos priklauso realaus laiko programų patikimumas, perkeliamumas ir palaikymas. Programinė įranga sukurta struktūriškai tam, kad vieno modulio pakeitimai turėtų minimalų poveikį kitiems moduliams. Moduliai leidžia pridėti arba atnaujinti modulius su minimaliomis projektavimo ir kūrimo pastangomis.

Pagrindinis PVS sistemos testavimo metodas yra scenarijus. Kiekvieną scenarijų sudaro paleidimas, veikimas, iš anksto apibrėžtas veiksmų našumas ir pilotui rodomų taikinių elgsena. Komandos ir metodinė veikla yra įterpta į PVS sistemą. Kandidatas pagal duotą scenarijų vykdo skrydį. Sudaroma scenarijų eilė su kintamu darbo krūviu. Pasiruošimą egzaminui sudaro scenarijų aprašymai, scenarijų parinkimas ir analizės aprašymai. Programinės įrangos modulis yra sukurtas analizuoti iš anksto apibrėžtų užduočių našumą. Analizės užduotis apibrėžia kiekvieną analizės įrankį sistemoje. Analizės pagrindinė užduotis koreliuoja su scenarijaus aprašymu ir sudaro analizės užduočių rinkinį.

PVS bandymą sudaro tokie etapai:

- instruktoriaus pasiruošimas egzaminui;
- kandidato egzamino atlikimas;
- instruktoriaus rezultatų analizė.

Kandidatas valdo imitatorių be instruktoriaus pagalbos. Pasiruošimas egzaminui susideda iš:

- pradinių orlaivio sąlygų, pilotui vaizduojamų taikinių elgsenos, taisyklių ir komandų scenarijuose analizės;
- išanalizuojamos kiekvieno scenarijaus užduotys. Pagrindinę užduotį sudaro kiekvienos sistemos įrankių aprašymai, t. y. ekrane išdėstytų mygtukų eilė, kuriais nurodomi, pvz., kokios bus pateikiamos oro sąlygos (kritulių tipas, matomumas, vėjo kryptis, KTT dangos būseną), kokie bus imituojami orlaivio gedimai (variklio, stabdžių, elektros sistemos, gaisras), taikinių padėtys ir jų judėjimo trajektorija bei greitis;
- pasirengimas yra atliekamas iš anksto ir tai leidžia sukurti naujus aprašymus arba redaguoti ar atnaujinti esamus aprašymus.

Imitatoriaus kabinoje, pagal kiekvieną scenarijų, kandidatas atlieka imituojamo orlaivio valdymo veiksmus. Visas skrydžio scenarijus apima:

- skrydžio imitavimą;
- taikinio manevravimo imitavimą;
- radaro imitavimą ir simbolių vaizdavimą;
- duomenų surinkimą iš įvesties prietaisų;
- garso imitavimą.

Kiekvienas skrydis analizuojamas atskirai pagal analizės aprašymus ir duomenis surinktus skrydžio vykdymo metu. Analizė atliekama įvairiomis funkcinėmis priemonėmis. Šioms priemonėms yra taikomos taisyklės ir sąlygos, kurios leidžia maksimalų lankstumą apibrėžtoje analizėje.

Analizės programa suteikia priemones, kurios leidžia instruktoriui įvertinti kandidato būdinguosius gebėjimus susidoroti su įvairiomis skrydžio misijomis. Tam tikros taisyklės nulemia kandidato galimybių vertinimo balą.

Kandidato veiksmų našumo įvertinimas yra paremtas skrydžio rezultatais kiekviename scenarijuje. Jis paremtas parametrais ir kriterijais, kuriuos nurodo instruktorius. Kandidato įvertinimas priklauso nuo visų scenarijuje numatytų užduočių išpildymo, jų atlikimo greičio, reakcijos į tam tikrus numatytus veiksmus.

Priemonių apibūdinimas. PVS sistemą sudaro priemonės, kurios aprūpina plataus spektro analize:

- taisyklėmis paremta analizė yra sudaryta pagal paprastą loginių sąlygų sąrašą, kuris naudojamas apibrėžiant reikalingus parametrus ir rezultatus;
- parametų identifikavimas yra kilęs iš skrydžio kintamųjų, kai jis pasiekia nurodytą ribą per tam tikrą laiką;
- kandidato reakcijos tinkamumo identifikavimas tam tikrose užduotyse ir jų reakcijos laikas;
- skrydžio parametų profilio palyginimas su ekspertų profiliu ir paties profilio kokybės analizė;
- laiko periodų analizė tarp įvairių įvykių (jungiklių aktyvavimas, vairalazdės judesiai ir kt.).

Shub (1994) pristatytą sistemą sudaro:

- piloto pajėgumai. Bendri piloto pajėgumai yra pagrindinis optimalių daugiaveiksmių užduočių atlikimo per ribotą laiką bruožas. Piloto pajėgumas iš esmės apibrėžia, kiek protinių pastangų yra panaudota per tam tikrą laiko vienetą. Todėl pajėgumas apibrėžia, kiek sėkmingai užduočių gali būti atliekama vienu metu;
- piloto dėmesio sutelkimas. Piloto veiksmų našumas yra charakterizuojamas pagal vykdomas kelias atitinkamas užduotis, nuolat triukšmingoje ir bekintančioje aplinkoje, su įvairiais nereikšmingais dirgikliais, kurie turi būti ignoruojami. Gebėjimas išlaikyti dėmesį reikšmingai informacijai ir jo nenukreipimas į neaktualią informaciją yra labai svarbus mažinant dėmesio pajėgumų naudojimą ir gerinant veiksmų našumą;
- piloto dėmesio paskirstymas. Poreikis paskirstyti dėmesį tarp kelių vienu metu atliekamų užduočių yra bene labiausiai naudojamas sėkmingo piloto metodas. Priešingai negu dėmesio sutelkimas, našus dėmesio paskirstymo panaudojimas nėra natūrali žmogaus galimybė. Tai reikalauja treniruočių ir nemažai pastangų;
- piloto dėmesio perkėlimas. Esant labai reikliai aplinkai vienu metu arba beveik vienas po kito gali įvykti du netikėti įvykiai iš dviejų skirtingų užduočių. Kartu šie įvykiai gali reikalauti visų piloto dėmesio pajėgumų. Tokios aplinkybės sukuria skirtingas piloto dėmesio perkėlimo

strategijas. Esant optimaliam našumui, pilotas turėtų skirti visus pajėgumus vienam įvykiui ir po to greitai pereiti prie kito įvykio, kai pirmasis įvykis buvo užbaigtas. Kuo greitesnis dėmesio perkėlimas, tuo didesnė tikimybė, kad abu įvykiai bus sėkmingai užbaigti. Literatūroje aptartos kelios dėmesio perkėlimo rūšys, įskaitant perkėlimą modalume, perkėlimą tarp modalumų bei perkėlimą tarp suvokimo ir atminties. Visi trys yra matuojami ir vertinami. Modalumas – pojūčio savybių ir kokybės nusakymas, pvz., spalva – regos modalinė savybė, tonas ir tembras – klausos, kvapo pobūdis – uoslės;

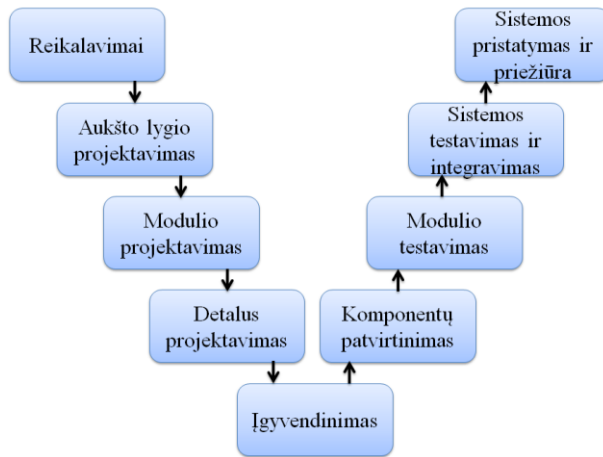
- piloto dėmesio paskirstymo strategijos valdymas. Kai kuriuose Shub (1994) nagrinėtuose naikintuvo imitatoriaus kovos scenarijų segmentuose iš tiesų gali atsispindėti laboratorijos aplinka, kurios pagrindinė užduotis (tyrime – taikinio stebėjimas) gauti visą reikalingą dėmesį optimaliam veiksmų našumui, kol antrinės užduotys (pvz., aukščio ir greičio išlaikymas bei garso analizavimas) naudoja tik nepanaudotus pajėgumus.

Tačiau netikėti įvykiai gali priversti pereiti prie bendro dėmesio strategijos, kurioje kai kuriuos protinius išteklius reikia nukreipti nuo pirminės užduoties siekiant tvarkytis su kitais įvykiais. Poreikių perskirstymo nustatymo nepakanka. Pilotas turėtų galėti greitai ir lanksčiai pritaikyti naują strategiją ir perskirstyti dėmesį pagal naujus poreikius. Shub (1994) pateiktas modelis yra visiškai išplėtotą autonominę vertinimo sistema. Jis, sukurtas remiantis daugelio ekspertų patirtimi, yra objektyvus ir gali būti pritaikytas daugeliui reikmių. Tačiau vertinimas vykdomas skrydžio imitatoriuje, bet nesiremiam realių skrydžių duomenimis. Jis taip pat tik prognozuoja piloto veiksmų našumą, o ne nurodo, koks veiksmų našumas buvo iš tiesų. Norint vertinti mokomuosius skrydžius, ypač realų jų atlikimą, modelis turėtų apimti ne tik scenarijus ir jų atlikimo kriterijus bet ir lyginti ar jungti juos su įvykdyto skrydžio duomenimis. Tam, kad kuriamas vertinimo modelis būtų patogus naudoti ir praktiškas bei apgalvotas reikėtų atsižvelgti į programinės įrangos kūrimo procesus.

Bendras požiūris į programinės įrangos kūrimą vadinamas programinės įrangos gyvavimo ciklu (1.34 pav.). Yra daug skirtingų gyvavimo ciklų įgyvendinimo būdų, kurie nurodomi programinės įrangos kūrimo procesuose. Įvairūs procesai turi skirtingus tikslus, pavyzdžiui, sumažinti patekimo į rinką laiką arba sumažinti bendras plėtos išlaidas. Natūralu, kad nors kaina ir laikas turi įtakos avionikos programinei įrangai, bet esminis tikslas yra įsitikinti, kad programinė įranga tinkamai užtikrina saugaus skrydžio eksploatavimo reikalavimus (Strunk 2006).

Programinės įrangos kūrimas prasideda nuo kliento reikalavimų analizės ir įvairių prototipų bei galimybių tyrimų, kurie padėtų suprasti problemą. Tikslas yra nustatyti visus kliento reikalavimus ir visas detales, kurioms trūksta

funkcionalumo ir praktiškumo. Vėliau reikalavimai yra detalizuojami dokumentuojant funkcijas, patikimumą, pasirinktos aparatinės įrangos detales ir visus kitus apribojimus, kurie gali būti reikalingi. Kai užbaigiamas detalizavimas, bendra sistema jau yra sukurta ir tuomet projektuojama kiekviena posistemė. Sistemos pertvarka į atitinkamas posistemas eina kartu su sąsajos projektavimu. Kartu, šie veiksmai gali palengvinti kuriamo kodo procesą vėlesniuose etapuose ir palengvinti sistemos sertifikavimą. Be to, modalumas ir duomenų uždarymas yra du svarbūs komponentų projektavimo aspektai programinėje įrangoje. Kiekvieno projektavimo etape programinės įrangos gyvavimo ciklo metu, dalyvaujantis klientas turi įsitikinti, kad kuriamas produktas atitiks jo reikalavimus ir lūkesčius (Strunk 2006).



1.34 pav. Įprastos programinės įrangos gyvavimo ciklas (Strunk 2006)

Fig. 1.34. Typical software lifecycle (Strunk 2006)

Reikia suprasti ir tai, kaip kompiuterinė sistema gali padėti vartotojui ir koks yra geriausias jos sąsajos su žmogumi būdas. Reikia žinoti vartotojo užduotis, jų ryšius su kitomis užduotimis ir geriausius atlikimo būdus naudojant kompiuterinę sistemą, reikalingos ir žinios apie žmogaus darbo aplinką (kultūrinę, geografinę, socialinę) (Švedaitė 2012). Remiantis vertinimo sistemai ir modelio sukūrimui reikalingomis žiniomis, kitame poskyryje pateikiamas duomenų gavimo būdų aprašymas kuriamam modeliui.

1.6. Skrydžio duomenų gavimo būdai

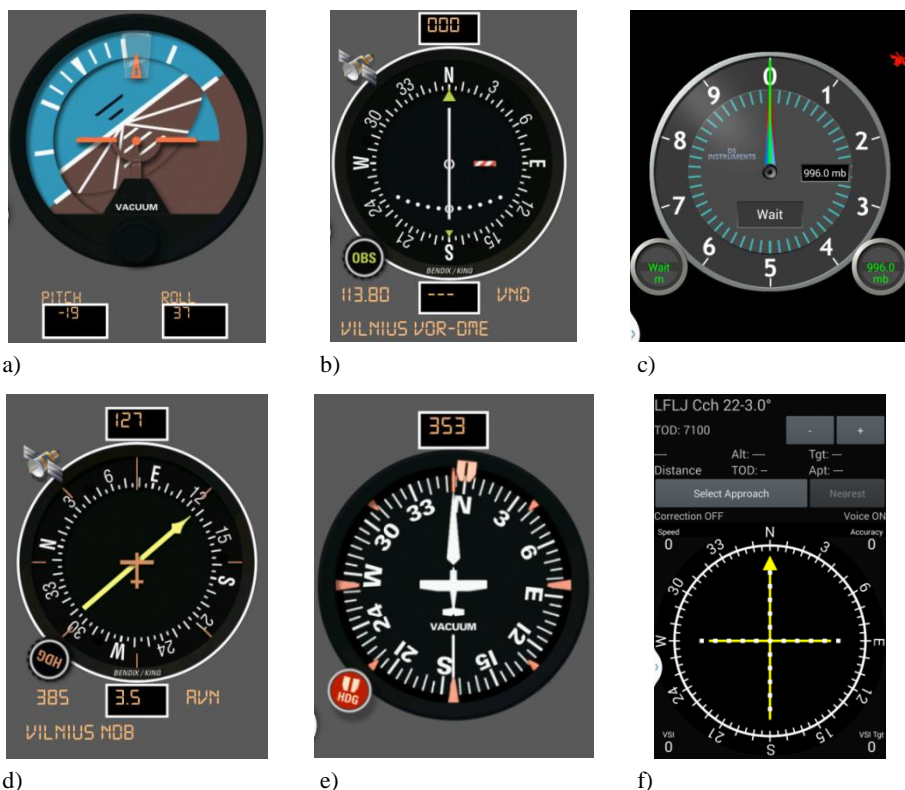
Poskyrio medžiaga publikuota mokslo leidinyje Aviacijos technologijos 2014, 17-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiagoje (Masiulionis, Stankūnas 2014).

Kartu su nuolatos tobulėjančiomis avionikos sistemomis, nesustabdomai į avionikos sistemas integruojamos išmaniosios technologijos, į kurias dešimtmetį dar buvo įtariai žvelgiama dėl pritaikomumo ir prasto jutiklių patikimumo. Per tą laikotarpį, išmaniųjų prietaisų aparatūrinė ir programinė įranga gerokai patobulėjo ir dabar žmogui padeda įvairiose gyvenimiškose situacijose. Šiuolaikinių mikroelektromechaninių sistemų (angl. *MEMS – Microelectromechanical system*) technologijos leido integruoti įvairius jutiklius, kurie suteikia informacijos apie supančią aplinką, į išmaniuosius prietaisus. Tikėtina, kad ateityje šių jutiklių parametrai gerės ir išmaniosios technologijos dar labiau plėsis. Šiuo metu išmanieji prietaisai naudojami mažųjų bepiločių orlaivių valdymui, orlaivių navigacijai ir skrydžio duomenų įrašymui bei orlaivių techninėje priežiūroje gedimų paieškai ir nustatymui.

Sensorworks, DS Software, Dierk Reuter yra sukūrusios programinės įrangos Android išmaniuosiuose prietaisuose, kurios gali rodyti įvairius orlaivio kabinos prietaisų skrydžio parametrus naudojant išmaniojo prietaiso įterptinius jutiklius: GNSS, slėgio, magnetometro, pagreitmačio ir kt. Remiantis šiais jutikliais ir naudojant duomenų bazę, galima parodyti orlaivio navigacinių švyturių (pvz., VOR/DME, NDB, ILS) prietaisų informaciją (1.35 pav.) (Masiulionis, Stankūnas 2014).

Neretai yra sudėtinga gauti tikslūs orlaivio skrydžio duomenis. Dažnas lengvasis mokomasis orlaivis neturi skrydžio duomenų savirašio (SDS) (angl. *FDR – Flight data recorder*), o, dėl griežtų civilinės aviacijos administracijos (CAA) ir orlaivio techninės priežiūros taisyklių, papildomų savirašio sistemų pajungimas prie esamų orlaivio sistemų yra neįmanomas. Todėl yra viena išeitis – naudoti autonominę duomenų surinkimo sistemą. Šiam tikslui galima naudoti išmaniųjų prietaisą. Gausų jutiklių kiekį turintys modernių išmaniųjų prietaisų surinkti duomenys gali būti tarpusavyje palyginti (patikslinti) ir naudojami piloto skrydžio vertinimui. 1.36 paveiksle matyti šiuolaikinių išmaniųjų prietaisų galimybės, kurios galėtų būti naudojamos piloto skrydžio vertinimui.

Pagrindinis piloto skrydžio vertinimo sistemos jutiklis yra GNSS, kuris šiuolaikiniuose išmaniuosiuose prietaisuose priima bent kelių palydovinių sistemų signalus, pvz., GPS ir GLONASS. Imtuvas apskaičiuoja orlaivio 4D koordinates: platumą, ilgumą, aukštį nuo vidutinio jūros lygio ir laikas. Pagal šiuos duomenis papildomai dar galima apskaičiuoti orlaivio žemės greitį, kursą, kilimo ir žemėjimo greitį, nuskristą atstumą. GNSS kurso duomenys gali būti patikslinami naudojant magnetometrą. Slėgio jutiklis gali būti naudojamas patikslinti GNSS imtuvo aukštį bei skrendant maršrutu pagal standartinį slėgį.



1.35 pav. Įvairūs orlaivio rodikliai Android išmaniajame prietaise:

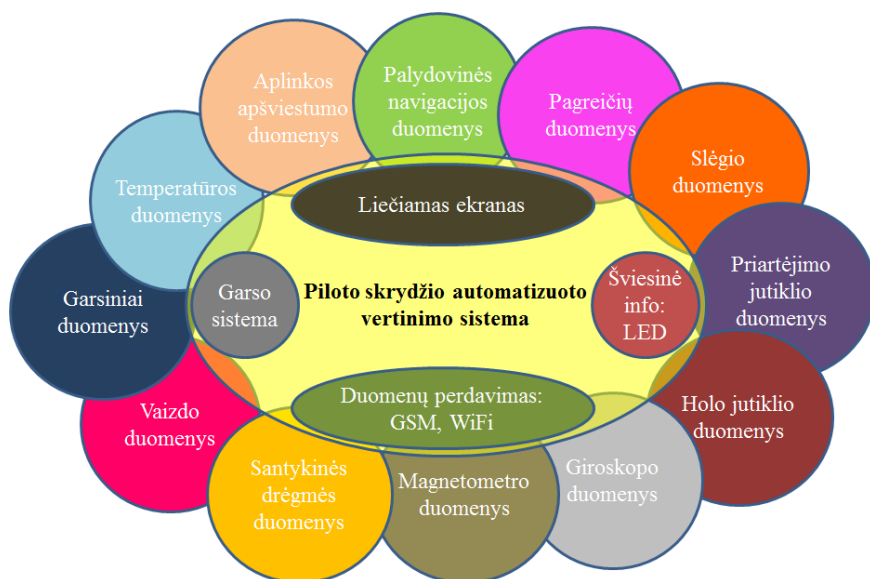
- a) Aircraft horizon; b) Aircraft VOR; c) Altimeter;
- d) Aircraft ADF; e) Aircraft compass; f) GPS ILS

Fig. 1.35. Various aircraft instruments in Android smart device:

- a) Aircraft horizon; b) Aircraft VOR; c) Altimeter;
- d) Aircraft ADF; e) Aircraft compass; f) GPS ILS

Išmaniojo prietaiso trijų ašių giroskopas ir pagreičio ir magnetometro jutiklis naudingi nustatant orlaivio ašines padėtis ir jų kitimo greičius: polinkį, posvyrį, pokrypį. Šiuo atveju, matavimo prietaisas (1.37 pav.) turi būti stabiliai pritvirtintas prie orlaivio pagal atitinkamas ašis (Lim 2014).

Orlaivio garsiniams duomenims gauti gali būti naudojamas išmaniojo prietaiso mikrofonas įrašant piloto pokalbius su instruktoriumi arba su skrydžio vadovais skrydžio metu. Deja, nebūtų girdimi skrydžio vadovo nurodymai. Toks įrašas padėtų įvertinti piloto veiksmus ir jo emocinę būseną. Taip pat gali būti įvertinama variklio trauka pagal jo sukuriamą dažnį (Masiulionis, Stankūnas 2014).



1.36 pav. Išmaniojo prietaiso jutiklių rinkinys reikalingas piloto skrydžio įvertinimui
Fig. 1.36. Required sensor set of smart device for pilot flight assessment



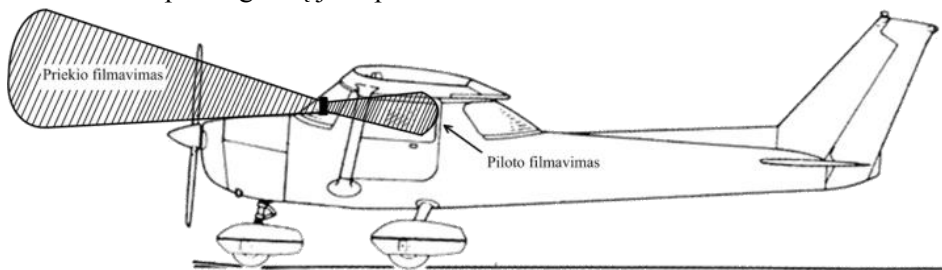
1.37 pav. Išmaniojo prietaiso jutiklių orientacija:
 polinkis (x), posvyris (y) ir pokrypis (z) (Lim 2014)

Fig 1.37. Orientation sensors of a smart device:
 pitch (x), roll (y) and yaw (z) (Lim 2014)

Piloto skrydžio vaizdo įrašymui gali būtų naudojamos išmaniojo prietaiso vaizdo kameros. Studentui atlikus savarankišką skrydį, vėliau skrydžio įrašas gali būti naudojamas vertinimui ir tam tikrų situacijų išaiškinimui. Kai kurie prietaisai palaiko dviejų kamerų įrašymą su vaizdu vaizde funkcija (angl. *PIP* – *Picture in picture*). Paprastai, išmaniojo prietaiso galinė kamera turi gerokai didesnę fotografavimo ir filmavimo raišką, negu priekinė kamera, todėl atitinkamai turėtų būti orientuota, kad didesnės raiškos kamera filmuotų didesnės svarbos vaizdus. Galimos kelios filmavimo padėty:

1. Išmanusis prietaisas pritvirtinamas ant priekinio orlaivio prietaisų skydelio (1.38 pav.). Tuomet filmuojama didesnės raiškos kamera skrydžio vaizdas, o priekinė prietaiso kamera filmuoja piloto veidą. Atliktas eksperimentas skrydžio treniruoklyje, kaip būtų matomas abiejų vaizdo kamerų vaizdas Samsung Galaxy S4 išmaniajame prietaise. Taip galima matyti ir skrydžio vaizdą, ir piloto emocijas valdant orlaivį. Tuo pačiu, išmaniojo prietaiso ekranas taip pat orientuotas į pilotus, todėl gali būti lengvai valdomas keičiant vertinimo režimus.
2. Išmanusis prietaisas pritvirtinamas ties pilotų sėdynių atlošais (1.39 pav.). Šioje padėtyje su didelės raiškos kamera matoma dalis priekinio skrydžio vaizdo, orlaivio priekinis prietaisų skydelis bei pilotų pečiai. Mažos raiškos kamera filmuoja orlaivio galinį vaizdą. Šis vaizdas svarbus, kai pilotas kyla, ir gale matoma, kaip pilotas išlaiko skrydžio kiltinės tiesiąją su KTT išilgine linija.

Skrydžio vaizdo įrašai būtų saugomi, kaip įrodymas ir, reikalui esant, atitinkami ekspertai galėtų juos peržiūrėti.

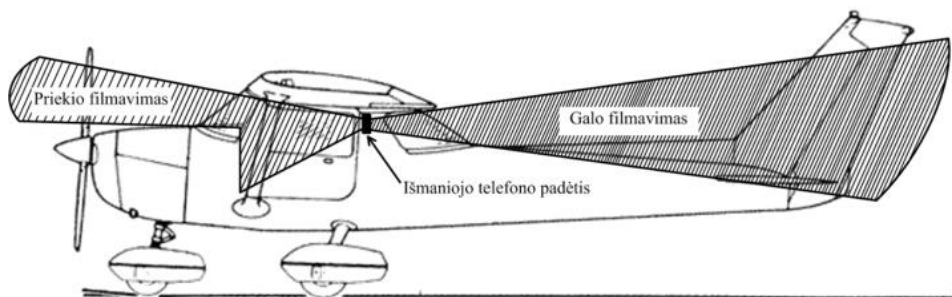


1.38 pav. Išmaniojo prietaiso priekinės ir galinės kameros aprėpiamo vaizdo sritys, kai jis pritvirtintas prie orlaivio priekinio stiklo

Fig. 1.38. The smart device front and rear camera display areas to be covered when it is attached to the windshield of the aircraft

Išmaniojo prietaiso temperatūros ir santykinės drėgmės jutikliai tikrintų, ar piloto kabinos aplinkos parametrai atitinka komforto ribas. Jei minėti parametrai neatitinka apibrėžtų komforto ribų, tuomet pilotas gali greičiau pavargti ir tai gali paveikti jo darbo našumą. Instruktorius apie tai būtų informuotas ir turėtų būti išsiaiškinta, ar pilotas negebėjo užsitikrinti sau tinkamos darbo aplinkos, ar galbūt buvo sugedus oro kondicionavimo sistema, kuri nesuteikė pilotui tinkamos darbinės aplinkos. Šviesos intensyvumo jutiklis, kaip ir paprastai, valdytų išmaniojo prietaiso ekrano apšvietimo intensyvumą pagal aplinkos apšvietimą. Priartėjimo jutiklį galėtų naudoti instruktorius, perjunginėjant tam tikrus vertinimo sistemos režimus ar skrydžio užduoties elementus rankų gestais,

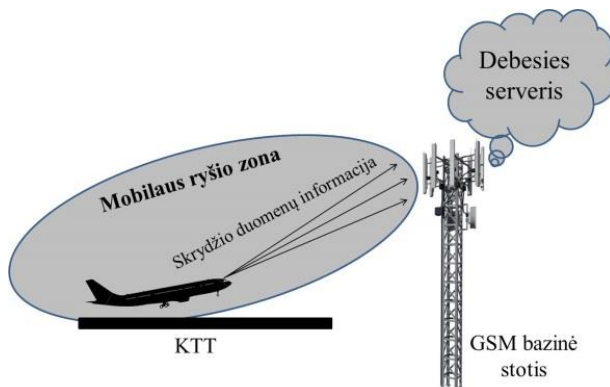
kad nereikėtų koncentruotis į prietaiso ekraną, o prietaiso garsinis signalas informuotų instruktorių apie režimų perjungimą.



1.39 pav. Išmaniojo prietaiso priekinės ir galinės kameros aprėpiamo vaizdo sritys, kai jis pritvirtintas už pilotų sėdinių

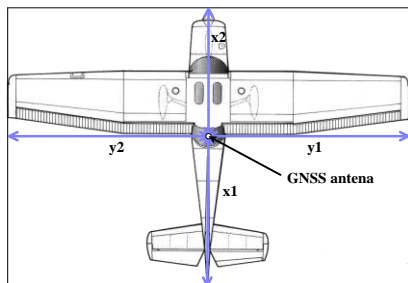
Fig. 1.39. The smart device front and rear camera display areas to be covered when it is mounted behind the pilots seats

Įvairių išmaniųjų prietaisų jutiklių komplektacija skirtinga bei jų matavimo tikslumas yra nevienodas ir jų duomenų pateikimo dažnis yra skirtingas. Siekiant gauti itin tikslūs skrydžio duomenis, būtina naudoti didelio tikslumo jutiklius. Tam tikslinga naudoti atskirą tikslių jutiklių modulį (su žinomu tikslumu), kuris skirtas pajungimui į išmanųjį prietaisą per USB (angl. *Universal serial bus*) sąsają. Išmanusis prietaisas būtų naudojamas tik duomenų surinkimui ir jų vaizdavimui ekrane. Tikslių išorinių jutiklių naudojimas gerokai pabrangintų skrydžio vertinimo sistemą.



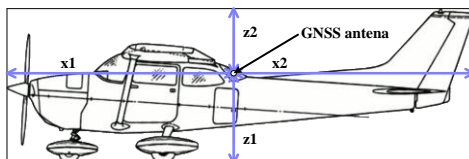
1.40 pav. Skrydžio duomenų perdavimas, kai orlaivis įskrenda į mobilaus ar bevielio Interneto zoną

Fig. 1.40. Flight data transfer, when aircraft fly in mobile or wireless Internet zone



1.41 pav. Matuojamo taško padėtis orlaivio atžvilgiu horizontalioje projekcijoje

Fig. 1.41. Position of measured point on the aircraft in the horizontal projection



1.42 pav. Matuojamo taško padėtis orlaivio atžvilgiu vertikalioje projekcijoje

Fig. 1.42. Position of measured point on the aircraft in the vertical projection

Paleidus vertinimo sistemą, programa turėtų susikalibruoti pagal turimus jutiklius ir orlaivio judėjimo kryptį įsitikinant, ar išmanusis prietaisas tinkamai orientuotas pagal orlaivio ašis.

Dar liko nepaminėtos svarbios išmaniųjų prietaisų duomenų perdavimo technologijos. Moderniuose prietaisuose yra integruoti gerai žinomi GSM (angl. *Global system for mobile communications*), GPRS (angl. *General packet radio service*), WiFi, Bluetooth duomenų perdavimo protokolai. Išmaniojo telefono mobilus internetas gali būti naudojamas skrydžio duomenų perdavimui realiu laiku į antžeminį kompiuterį. Tai aktualu, kai studentas atlieka savarankišką skrydį ir svarbu matyti orlaivio skrydžio trajektoriją. Tačiau mobilus ryšio operatoriai negali tinkamai užtikrinti signalo perdavimo ore, kadangi visų ryšio antenų, esančių ant bokštų, kryptingumo diagramos yra nukreiptos į žemę (Masiulionis 2011). Todėl duomenų perdavimas gali būti patikimas tik aerodromo prieigose, kai orlaivis skrenda žemai (1.40 pav.). Taip pat, mobilus ryšys turi greičio apribojimus ir orlaivis neturėtų viršyti 250 km/h skrydžio greičio (Lipovac 1999). Mokomieji orlaiviai, paprastai šio greičio nesiekia ir dėl to duomenų perdavimo nesutrikdytų. Nepaisant to, surinkti duomenys gali būti perduodami jau nutūpus orlaiviui ir skrydis gali būti įvertintas, kol orlaivis nuriedės iki stovėjimo aikštelės. Toks duomenų perdavimas gali būti atliekamas naudojant ir vietinę bevielio tinklo (WiFi) prieigos stotelę ir nemokant ryšio operatoriui mokesčio už mobilų ryšį.

Vienas iš pagrindinių skirtumų tarp išmaniojo ir specialaus prietaiso, kuris paprastai turi jam paskirtą vietą orlaivyje, yra tai, kad pastarajam kyla mažiau problemų dėl netinkamo naudojimo (Guiry 2014). Kad išmanusis prietaisas tinkamai atliktų jam paskirtą užduotį, turi būti keliami reikalavimai tiek jam

pačiam, tiek jo tinkamam įtvirtinimui orlaivyje. Siekiant, kad kuo tiksliau įrašyti skrydžio duomenis, idealiausia, kad imtuvas būtų įmontuotas orlaivio geometriniam centre (1.41 ir 1.42 pav.) taip užtikrinant, kad orlaivio dalys neišeis už draudžiamų skrydžio tunelio ribų.

Montavimo netikslumų išvengiama naudojant integruotus orlaivio skrydžio savirašius. Orlaivio Garmin G1000 integruotasis skrydžio prietaisas nuo v0563,20 programinės versijos suteikia galimybę surinkti ir įrašyti į išorinę atmintį (standartinę SD kortelę) svarbiausius skrydžio parametrus, kurie gali būti panaudoti piloto skrydžio vertinimui. Šio prietaiso trūkumas, kad negali tiesiogiai siųsti skrydžio duomenų į kompiuterį su veikiančia piloto skrydžio vertinimo sistema. Priklausomai nuo orlaivio konfigūracijos, Garmin G1000 gali įrašyti skrydžio duomenis (E priedo E.2 lentelė) CSV (angl. *Column separated value*) formato rinkmenoje (Garmin 2011).

Kombinuojant Matlab programinę paketą ir Holux M215 GPS imtuvą, galima rinkti GNSS duomenis, apdoroti ir pagal poreikius sukurti realaus laiko piloto skrydžio vertinimo sistemą (Masiulionis 2016). Toliau šiuo būdu bus atliekami skrydžio vertinimo tyrimai.

1.7. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. Orlaivio piloto skrydžio tikslumas – viena svarbiausių temų skrydžių saugos gerinimą nagrinėjančioje mokslinėje literatūroje. Nustatyta, kad yra gauta eilė tyrimų rezultatų, kurie gali būti panaudoti užtikrinant skrydžių saugą. Pasitelkiant šiuolaikinę įrangą tyrimuose, kurių metu siekiama išanalizuoti piloto smegenų veiklą ir elgsenos savybes skrydžio metu. Kuriamos sistemos, gebančios padėti pilotui apsispręsti susidariusiose kritinėse situacijose. Pasinaudojus sukurtais žmogaus elgesio modeliais ir optines navigacijos priemonės, kurios leidžia stebėti piloto kūno judesius, siekiama nuspėti piloto valdymo ypatumus ir pagal juos sudaryti atitinkamą orlaivio sistemos atsaką. Pagal tyrimų gautus rezultatus, kuriamos įvairios skrydžio navigacinę tikslumą gerinančios sistemos bei tobulinama orlaivio pilotų kabinos ergonomika.
2. Aiškėja, kad nėra sukurta šiuolaikinėmis techninėmis priemonėmis ir technologijomis paremta piloto skrydžio tikslumo vertinimo sistema:
 - literatūroje sutinkamos skrydžio tikslumo vertinimo priemonės analizuoja tik atskirus skrydžio fragmentus ir nėra išvystyta visas orlaivio skrydžio fazes apimančių tikslumo vertinimo sistemų;

- sukurtos skrydžio vertinimui skirtos priemonės nelanksčios: nepateikia visų reikiamų skrydžio parametrų. Priemonės dažniausiai yra uždaro kodo ir yra sunkiai patobulinamos pagal esamus poreikius;
 - sudarytos vertinimo skalės remiasi subjektyviu arba piloto, arba instruktoriaus vertinimu. Pats pilotas, ypač turintis nedaug praktinės patirties, dažnai nesugeba įvertinti savo orlaivio valdymo, profesionalūs pilotai linkę savo gebėjimus pervertinti;
 - visas vertinimo modelis turėtų remtis ne tik suformuluotais užduočių atlikimo kriterijais, kuriems priskiriamos tam tikros vertės, bet ir realiais bandymų duomenimis. Realų skrydžių vertinimui galėtų būti taikomi skrydžio tunelių modeliai, kurie iki šiol buvo taikomi ne skrydžio tikslumui vertinti, bet tik kaip piloto pagalbinė priemonė, vizualizuojant jo skrydžio trajektoriją.
3. Viena iš perspektyviausių priemonių automatizuotai skrydžio tikslumo vertinimo sistemai sudaryti galėtų būti skrydžio trajektorijos modeliavimas erdviniais tuneliais, kurie leistų matuoti orlaivio vertikalius ir horizontalius nuokrypius nuo nurodytos skrydžio trajektorijos ašies.
 4. Vertinant atliktos literatūros analizės rezultatus, šiam darbui formuluojami uždaviniai. Pasitelkiant Matlab programinę įrangą bei šiuolaikines GNSS principu grindžiamas orlaivio padėties nustatymo priemones, sudaryti automatizuotus skrydžio tunelio principu grindžiamus skrydžio tikslumo vertinimo modelius, kurie apimtų visus skrydžio etapus, sudarant automatizuotus skrydžio tikslumo vertinimo modelius: aerodromo rato modelį, laukimo zonos modelius, skrydžio maršrutu modelį ir sraigtasparnio slalomo užduoties modelį.

Orlaivio pilotų skrydžio trajektorijų vertinimo modelių sudarymo metodika

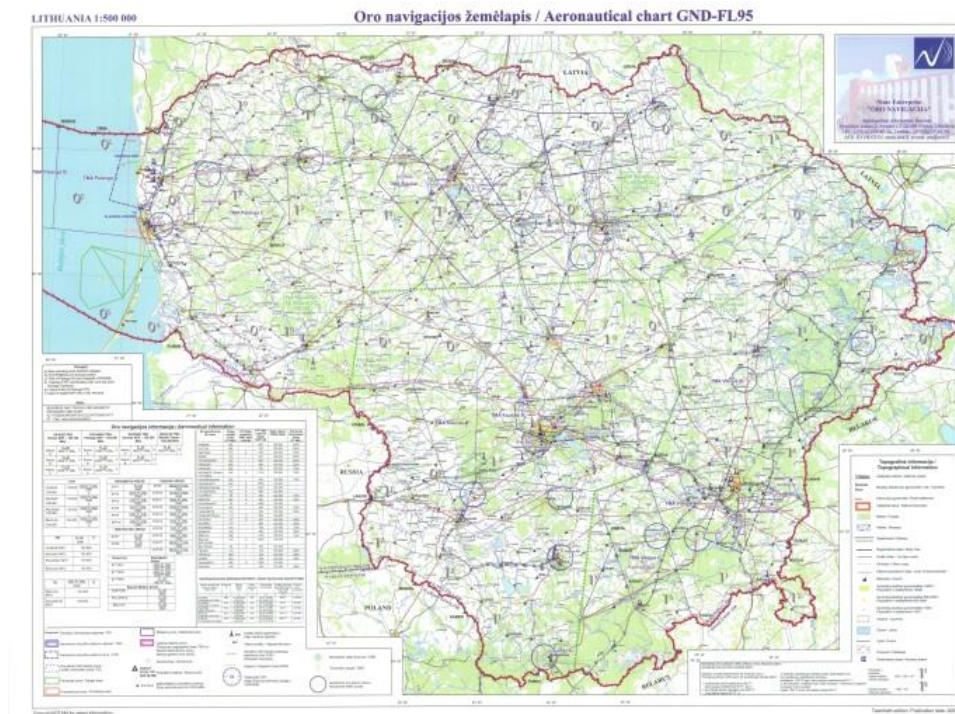
Šiame skyriuje kuriamos piloto vertinimo priemonės ir skrydžio tuneliais pagrįsti vertinimo modeliai, taikant Google Earth ir Matlab programines įrangas, leisiančios instruktoriui objektyviai įvertinti piloto skrydžio trajektorijos tikslumą. Sukurti modeliai apima visas pagrindines skrydžio užduotis: lėktuvo aerodromo rato, skrydžio maršruto ir laukimo zonos elementus, bei sraigtasparnio slalomo užduotį. Šio skyriaus medžiaga autoriaus paskelbta Aviation (Masiulionis 2016) ir Transport žurnaluose (Masiulionis 2017).

2.1. Skrydžio duomenų analizės priemonės

Atlikus programinės įrangos analizę, pastebėta, kad skrydžiams skirtos analizės priemonės ne itin detalios parodo skrydžio parametrus, kurie būtini tinkamai įvertinti piloto skrydį.

Sukurti informatyvų ir viską apimančių oro navigacijos žemėlapių yra sudėtinga. Iš vienos pusės, reikalinga surinkti daug informacijos, iš kitos pusės, žemėlapis tampa labai apkrautas pernelyg daug elementų, kurie gali vienas kitą dengti ir dėl to gali nesimatyti svarbių žemėlapio elementų.

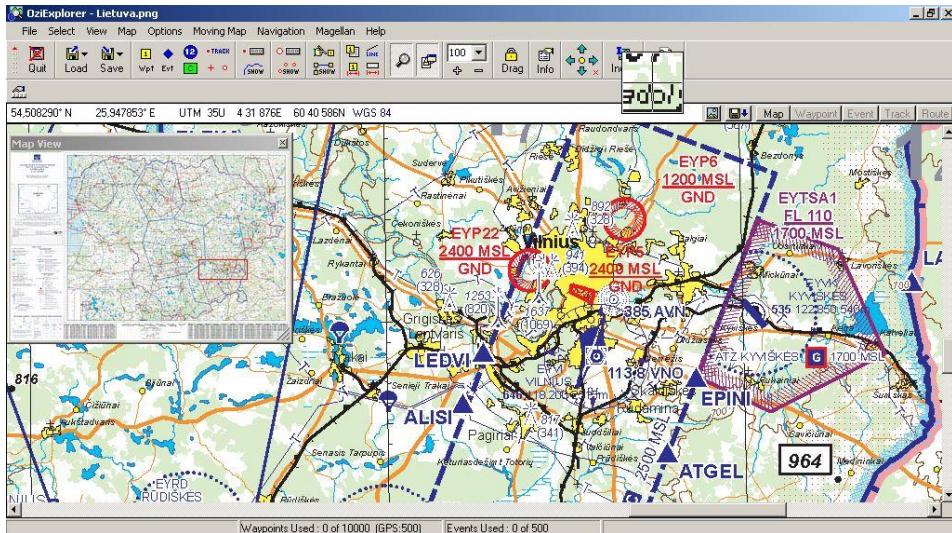
Dabar egzistuojančios skrydžio parametrus vaizduojančios programinės įrangos nevisiškai tenkina dabartinius instruktoriaus vertinimui būtinų priemonių poreikius. Besimokantys skraidyti pilotai stengiasi prisilaikyti skrydžio maršrutų pagal erdvėje išdėstytus menamus praskridimo taškus, kurie yra sužymėti valstybių oro navigacijos žemėlapiuose (2.1 pav.).



2.1 pav. Statinis Lietuvos oro navigacijos žemėlapis (www.ans.lt)

Fig. 2.1. Static aeronautical chart of Lithuania (www.ans.lt)

Norint paprastai sulygtinti praskridimo taškus ir orlaivio skrydžio trajektoriją, šiam tikslui galima naudoti OziExplorer programinę įrangą (2.2 pav.), kurioje turimus grafinius arba rastrinius oro navigacijos žemėlapius galima sukalibruoti pagal tiksliai žemėlapyje žinomus taškus. Paprastai, oro navigacijos žemėlapiai yra gana didelės raiškos, kad galėtume vertinti piloto skrydžio tikslumą maršrute, tačiau aerodromo zonose raiškos nebepakanka, kad būtų įmanoma įžvelgti žemėlapių elementus skrydyje ratu. Programinė įranga gali veikti realiu laiku, jei yra prijungtas GNSS imtuvas.



2.2 pav. Rastrinių ir grafinių oro navigacijos žemėlapių naudojimas
OziExplorer programinėje įrangoje

Fig. 2.2. Use of bitmap and graphical aeronautical charts
in OziExplorer software



Kitas naujoviškas būdas vertinti pilotą atkartojant jo skrydį iš skrydžio įrašų rodant skrydį iš piloto kabinos perspektyvos. Tokią vaizdavimo technologiją naudoja IGC Flight Replay (2.3 pav.) programinė įranga, kuri naudoja Google žemėlapius ir panašiai veikia, kaip Google Street view. Kartu su skrydžio atkartojimu rodomas skrydžio aukštis ir keletas orlaivio rodiklių, kuriuose galima matyti tikrąjį skrydžio greitį, kilimo ir žemėjimo greitį. Pagal skrydžio greitį ir kurso pokytį, imituojami atitinkami orlaivio posvyriai. Papildomai galima įjungti orlaivio skrydžio aukštingumo grafiką.

Skrydis gaunėtinai tikroviškai vaizduojamas, tačiau nematant skrydžio atraminių taškų, pagal kuriuos pilotas turėjo skristi, neįmanoma piloto tinkamai įvertinti. Nebent pilotas skristų pagal antžeminius objektus, pvz., kalnai, gyvenvietės, bokštai, bažnyčios. Tačiau tos būdas ne visada taikomas.

Tolimesniame etape buvo išbandyta Google Earth programinė įranga, kuri palaiko daugiasluoksnius žemėlapius, bei vartotojo sluoksnių kūrimą. Išmanusis daugiasluoksnis žemėlapis turi galimybę jame pasirinkti, kokius reikalingus sluoksnius rodyti, o nereikalingus galima paslėpti. Taip yra įmanoma išsirinkti, konkrečiu momentu, reikalingą navigacinę informaciją.

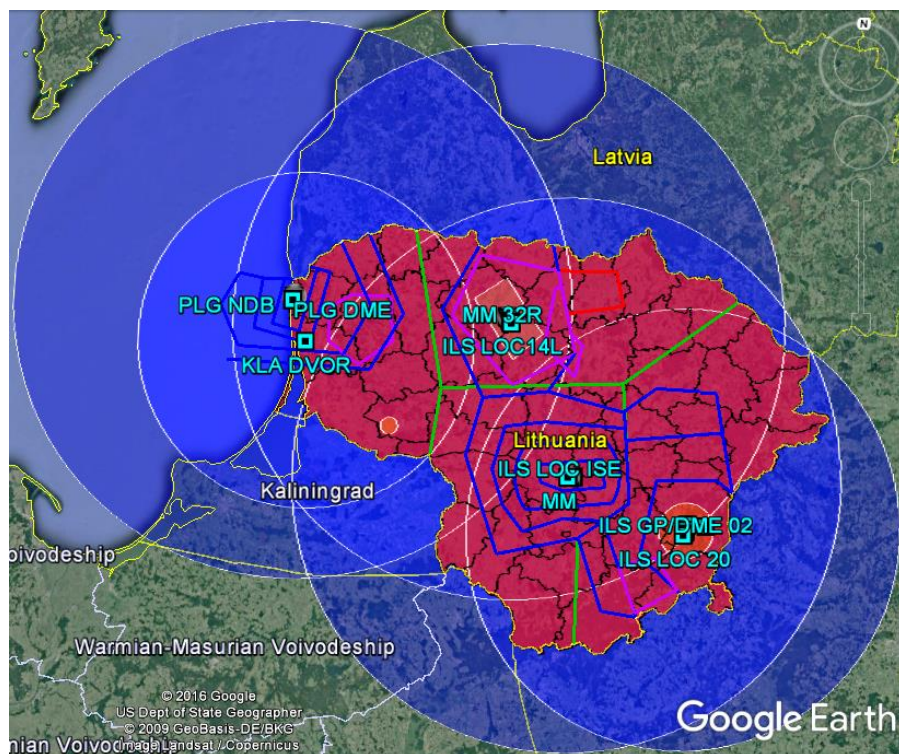
2.2. Skrydžio maršrutu duomenų analizės galimybės

Paprastai, daugiasluoksniuose žemėlapiuose galima pasirinkti, kokią informaciją yra norima matyti. Pvz., koordinacių tinklėlį, kelius, upes, ežerus, valstybių ir apskričių ribas, lankytinas vietas ir kt. Tačiau šie objektai nepadeda įvertinti piloto skrydžio.

Remiantis 2.1 paveikslu ir kitų aerodromų dokumentų informacija, sudarytas oro navigacijos žemėlapis, kurio bendras vaizdas matomas 2.4 paveiksle. Sudarytame oro navigacijos žemėlapyje papildomai galima rodyti įvairias navigacijos zonas: skrydžių informacijos regionus (angl. *FIR* – *Flight information regions*), aukštuminius skrydžių informacijos regionus (angl. *UIR* – *Upper flight information regions*), kontroliuojamas zonas (angl. *CTR* – *Control zones*), oro uostų prieigos kontroliuojamas oro erdves (angl. *TMA* – *Terminal maneuvering areas*), aerodromo eismo zonas (angl. *ATZ* – *Aerodrome traffic zones*) ir kt.

Interaktyvus žemėlapis pranašumas prieš kitus panašius navigacijos žemėlapius:

- žemėlapis neapkraunamas tam tikru naudojimo momentu nereikalinga informacija. Instruktoriaus gali įjungti reikalingus ir išjungti nereikalingus informacinius sluoksnius. Tokiu būdu interaktyviame žemėlapyje galima naudoti daug įvairios vertinimui svarbios informacijos;



2.5 pav. Lietuvos radionavigacinių priemonių veikimo zonos (apskritimai)

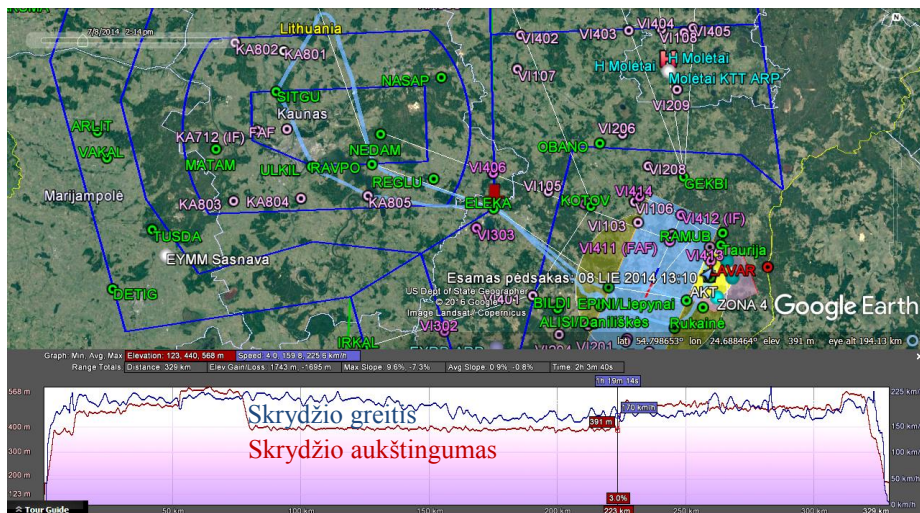
Fig. 2.5. Coverage zones of Lithuania radionavigation equipment (circles)

Papildomi vizualizacijos elementai padeda vaizduoti skrydžio trajektorijos kurso ir aukščio pokyčius trijose dimensijose (3D) (2.7 pav.).

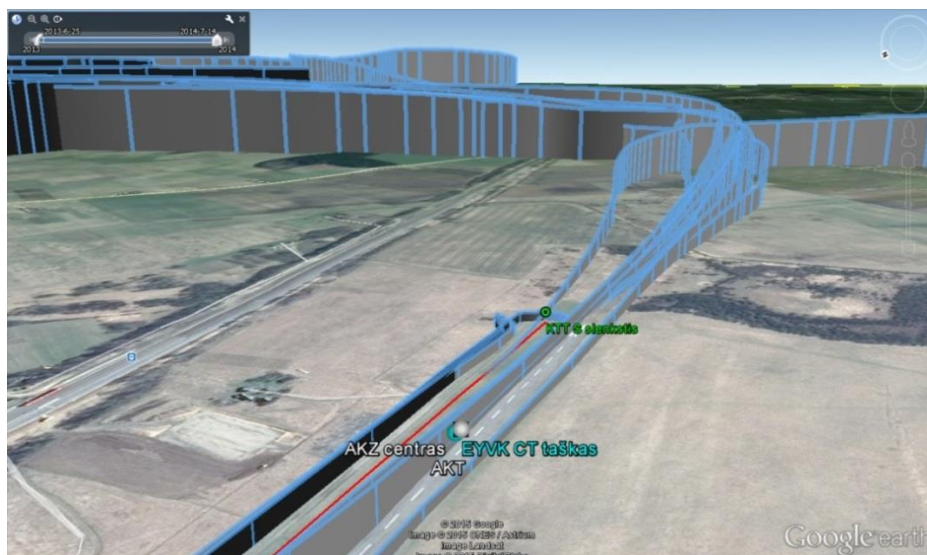
Nepaisant šių privalumų, šis skrydžio vertinimo metodas turi ir trūkumų. Viskas gerai, kol oro navigacijos tarnyba (angl. *ANS – Air navigation service*) neišleidžia oro navigacijos žemėlapių pakeitimų. Tuomet būtina sutikrinti ir patikslinti visų linijų ir taškų koordinatas. Be to, norint sudaryti tokį patį interaktyvų žemėlapi kitoje valstybėje, reikia jau remtis pageidaujamos valstybės oro navigacijos žemėlapiais ir viską pradėti nuo pagrindų. Tokio žemėlapių sudarymas trunka pakankamai ilgai.

Susiduriama ir su sunkumais vertinant skrydį aerodromo rate. Buvo pasiūlytas aerodromo rato koncepcinis modelis (2.8 pav.) su vertinimo lygiais, tačiau šis aerodromo vertinimo ratas turėjo stačiakampius posūkius, nes Google Earth neturi specialių priemonių sudaryti posūkių lankams (Masiulionis, Jakučionis 2011). Vėliau buvo atrastas specialus interaktyvus įrankis internete,

kuris geba sudaryti apskritimus, nurodant apskritimo centro koordinates ir apskritimo spindulio ilgį. Tokiu būdu sudaryta aerodromo ATZ zona (2.9 pav.), taip pat sužymėtos aerodromo laukimo zonos.



2.6 pav. Skrydžio analizė Google Earth programinėje įrangoje
Fig. 2.6. Analysis of flight in Google Earth software



2.7 pav. Erdvinė aerodromo rato trajektorijų analizė ties kilimo ir tūpimo taku su ištemptomis vertikaliomis linijomis iki žemės
Fig. 2.7. Spatial analysis of traffic circuit flight trajectory near the runway with extended vertical lines



2.8 pav. Vizualizuotas skrydžio tunelis Google Earth programoje

Fig. 2.8. Visualized flight tunnel in Google Earth software



2.9 pav. Kyviškių aerodromo laukimo zonos ir praskridimo taškai

Fig. 2.9. Kyviškės aerodrome holding areas and waypoints

Tačiau sudarinėti atitinkamus aerodromo ratus su vertinimo lygiais, kurie turėtų apskritus posūkius, buvo atsisakyta, kadangi aerodromo ratai gali labai kisti, priklausomai nuo įvairių sąlygų: orlaivio kategorijos, orlaivių skaičiaus

aerodromo rate, atitinkamos užduoties. Todėl sekančiame poskyryje, aerodromo rate vertinimui nuspręsta kurti automatizuotas programines priemones Matlab terpėje.

2.3. Orlaivio pilotų skrydžio tuneliais grindžiamų trajektorijų vertinimo modelių sudarymas Matlab terpėje

Pasaulyje nuolatos kuriami ir tobulinami įvairių sistemų modeliai bei algoritmai, kurie automatų pagalba atlieka rutinines bei aiškiai apibrėžtas užduotis. Daugeliu atveju modeliai geba analizuoti, palyginti ir įvertinti nusistovėjusias normas.

Ankstesniame poskyryje aptartos Google Earth programinės įrangos trūkumus papildė Matlab programinė įranga, kuri leidžia automatizuoti specializuotų trajektorijų sudarymą pagal iš anksto nurodytus skrydžio trajektorijų sudarymo parametrus. Naudojantis automatizuotais vertinimo tunelių modeliais, galima greitai sudaryti skrydžio vertinimo trajektorijas ir lengviau vizualiai įvertinti ar net tiksliai apskaičiuoti piloto skrydžio nuokrypius nuo nurodytosios idealiosios trajektorijos. Vertinimo tunelis – tai nurodyto dydžio oro erdvės menamos ribos, pagal kurias vertinamas piloto skrydžio tikslumas. Siekiant aiškiau pavaizduoti piloto skrydžio nuokrypius, vertinimo tunelis pavaizduojamas horizontalioje bei vertikalioje plokštumoje.

Automatizuotos piloto vertinimo sistemos kūrimas yra kompleksinis ir sudėtingas procesas. Tam, kad būtų objektyviai įvertintas piloto skrydis, reikalinga vertinti daugelį veiksnių: tiek piloto psichologinę būseną, jo reagavimą į išorinius dirgiklius, bei jo atliekamų skrydžio pratimų tikslumą. Tačiau šioje disertacijoje orientuojamasi vertinti tik piloto skrydžio tikslumą.

Be to, šiuo metu kuriami skrydžio vertinimo tunelių modeliai nevertina meteorologinių sąlygų. Pilotas turi pats įvertinti esamas meteorologines sąlygas (pvz., vėjo kryptį ir jo greitį) ir pagal jas bandyti išlaikyti nurodytą skrydžio trajektoriją. Žinoma, meteorologiniai duomenys suteiktų instruktoriui papildomos informacijos, kodėl vienur ar kitur buvo neišlaikyta skrydžio trajektorija ir duoti pilotui reikiamas rekomendacijas tikslesniam užduoties įvykdymui. ICAO dokumentuose išskiriami šie pilotui svarbūs meteorologiniai duomenys: oro temperatūra; vėjo kryptis; vėjo greitis; blaška; orlaivio ledodara; santykinė oro drėgmė. Meteorologinių duomenų gavimui gali būti naudojamos meteorologinių stočių duomenys, kurios pateikia savo informaciją internete ar kitais duomenų perdavimo formatais (pvz., *JSON – Javascript object notation* arba *XML – Extensible markup language*). Teikiamos meteorologinių stočių

paslaugos gali būti mokamos. Išvardinti duomenų formatai gali būti nuskaityti Matlab programiniu paketu ir naudojami piloto skrydžio tikslumui įvertinti.

2.3.1. Orlaivio piloto skrydžio automatizuoto vertinimo koncepcija

Pilotas skrydį atlieka laikydamasis įvairių skrydžio instrukcijų ir naudoja giroskopines, slėgio ir radijo navigacines priemones, kur pastarosiose taikomi kampų, atstumų ir laiko matavimo principai.

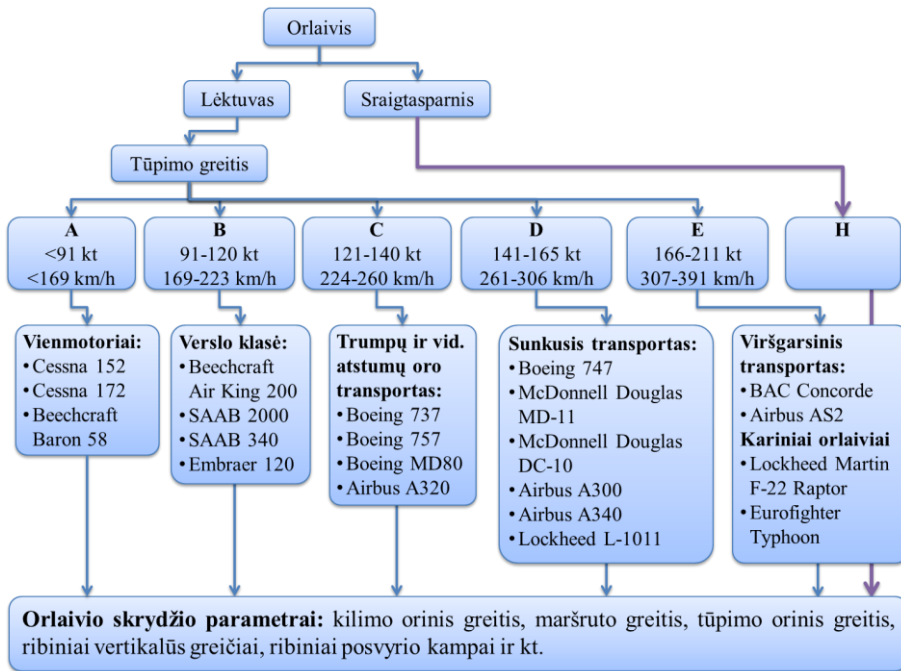
Kilimas ir tūpimas yra pavojingiausi skrydžio etapai, kurių metu įvyksta daugiausiai orlaivio avarių. Kai pabrėžia Lacabanne (2012), kilimas ir tūpimas yra daugiausiai reikalaujantys piloto susitelkimo ir dėmesio. Literatūros analizės metu pastebėta, jog neatlikta išsamių tyrimų, kad būtų tinkamai stebimi ir vertinami pilotų pasiekimai šiuose skrydžio etapuose, kuriuose dažniausiai įvyksta įvairios orlaivių avarijos.

Žinoma, skrydžio imitavimas gali būti atliekamas įvairiais būdais, bet šiomis dienomis kompiuterių naudojimas yra norma. Šiam tikslui panaudosime Matlab programinį paketą, kadangi tai plačiai naudojama inžinerijos priemonė ir įrodyta, kad yra galingas įrankis sprendžiant įvairius inžinerinius uždavinius (Kraeger 2007).

Siekiant didesnio automatizavimo ir lengvesnio valdymo, sistema turi turėti pakankamai funkcijų ir parametrų, kurie aprašo orlaivio veikimo charakteristikas. Kiekvienas orlaivis turi savas kinematinės ir dinaminės charakteristikas, pagal kurias turėtų būti sudaromi atitinkami skrydžio trajektorijų parametrai, kad neviršytų orlaivio galimybių ribų, nesukeltų didelių skrydžio perkrovų ir pilotas galėtų komfortiškai ir gerai mokėdamas valdyti orlaivį, turi be didelių pastangų atlikti jam pateiktą treniruočių užduotį. Kad vertinimo sistema būtų lankstesnė ir instruktoriui keičiant orlaivius nereikėtų nuolatos keisti skrydžio vertinimo sistemos parametrų, turėtų būti sudaroma patogi sistemos valdymo grafinė sąsaja, kurioje pažingsniui nustatoma iš anksto apibrėžtų parametrų grupė, priskirta konkrečiam orlaiviui. Remiantis ICAO (2006; 2009b) orlaivių klasifikacija, tikslingiausia orlaivio parametrus skirstyti pagal jų tūpimo greičius, todėl 2.10 paveiksle sudaryti pirminiai vertinimo sistemos grafinės sąsajos ryšiai, automatiškai nurodantys atitinkamus skrydžio vertinimo trajektorijų parametrus. Pagal pasirinktą atitinkamą orlaivio klasę, yra žinomi svarbiausi orlaivio parametrai: kilimo orinis greitis, maršruto greitis, tūpimo orinis greitis, ribiniai vertikalūs greičiai, ribiniai posvyrio kampai ir kt.

Nuo orlaivio klasės priklauso orlaivio greitis. Paprastai, greitesnis orlaivis sąlyginai būna ir didesnis. Todėl pagal orlaivio greitį ir jo leidžiamus maksimalius posvyrio kampus, atitinkamai turi būti sudaromi skrydžio trajektorijų posūkiai, turintys reikiamo dydžio spindulius. Priklausomai nuo

orlaivio greičio, turėtų būti sudaromos atitinkamo ilgio skrydžio trajektorijos, kad orlaivis spėtų įsibėgėti, pakilti, atlikti reikiamus manevrus ir saugiai nutūpti.



2.10 pav. Orlaivių klasifikacija pagal orlaivių greičius

Fig. 2.10. Classification of aircraft by their speeds

Remiantis literatūros analize ir nagrinėjamos transporto priemonės – orlaivio – charakteristikomis, matyti, kad labiausiai tiktų modeliais grindžiama skrydžio tunelių koncepcija. Taigi kiekvienai skrydžio užduočiai yra sudaryti programiniai modeliai, kurie turi, aviacijoje įprastą, keturių lygių vertinimo sistemą. Vertinimo modelius sudaro trijų lygių vertinimo tuneliai, kuriais nustatomas piloto skrydžio tikslumas. Orlaiviui nepažeidus vidinio tunelio ribų, piloto skrydis vertinamas balu 10 (puikiai), nepažeidus viduriniojo tunelio, vertinimas – 9 (gerai), nepažeidus išorinio tunelio, vertinimas – 8 (patenkinimai), pažeidus išorinį tunelį, vertinimas – <8 (neįskaityta). Sukurti skrydžio vertinimo tuneliai yra lankstūs, leidžiantys prisitaikyti tiek prie orlaivio tipo, tiek prie jų valdymui keliamos užduoties bei pilotui keliamų reikalavimų. Norint atsižvelgti į skirtingus orlaivių tipus ir kuo tiksliau prisitaikyti prie jų galimybių bei jų valdymui keliamų uždavinių, buvo kuriami skirtingi skrydžio vertinimo modeliai: lėktuvo aerodromo ratui, laukimo zonoms bei skrydžio

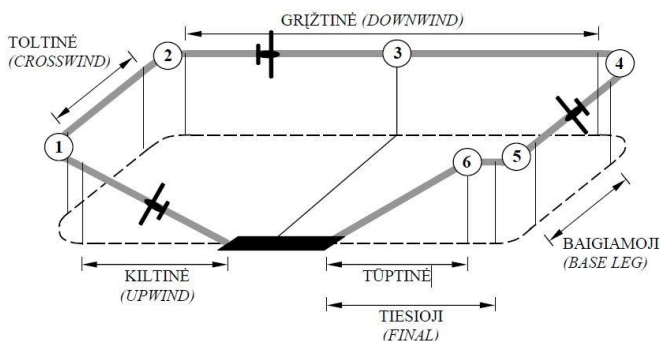
maršrutui. Taip pat sukurtas vienas modelis sraigtasparnio slalomo skrydžio užduočiai. Toliau bus pateikiamas platesnis kiekvieno iš šių modelių aptarimas.

2.3.2. Lėktuvo piloto aerodromo rato trajektorijos tikslumo vertinimo programinis modelis

Aerodromo rato vykdymo eiga. Lėktuvų skrydžio treniruotės skirstomos į tris stambiuosius etapus: 1) skrydis aerodromo rate; 2) skrydis laukimo zonoje ir 3) skrydis maršrutu. Kiekvieną iš šių etapų užduočių hierarchijoje sudaro dar smulkesni užduočių elementai, tobulinantys konkrečius piloto skrydžio įgūdžius.

Aerodromo ratas yra viena iš pirminių užduočių, kurią pilotas atlieka pakilęs į orą. Aerodromo ratą sudaro 5-ios dalys (2.11 pav): 1 – kiltinė; 2 – toltinė; 3 – grįžtinė; 4 – baigiamoji; 5 – tūptinė. Atliekant skrydžius aerodromo ratu, praktiškai, įvykdomi visi orlaivio skrydžio etapai, kuriuose pilotai tobulina savo įgūdžius. Pagal tam tikras procedūras, skrydžio etapai skirstomi (Savičienė 2012; ICAO 2009):

- riedėjimas nuo perono iki pakilimo taško;
- pakilimas ir kopimas link pasirinkto maršruto pagal skrydžio vadovų nurodymus;
- skrydis maršrutu pagal skrydžio vadovų nurodymus;
- žemėjimas į oro uosto prieigas;
- artėjimas tūpimui ir nutrauktas tūpimas;
- tūpimas ir riedėjimas į peroną.



2.11 pav. Aerodromo rato struktūra (Žilienė 2008)

Fig. 2.11. Traffic circuit structure (Žilienė, 2008)

Prieš skrydį instruktorius apibrėžia planuojamo skristi aerodromo rato parametrus. Aerodromo rato užduoties pradžioje būtina įsibėgėti iki orlaivio gamintojo nurodyto kilimo greičio (orlaivio Cessna 172 kilimo greitis 65–70 kt, t. y., 120–130 km/h) ir pakilus išlaikyti pastovų kilimo greitį. Pasiekus >700 ft

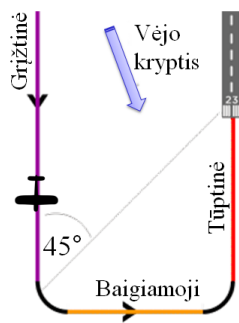
(213 m) aukštį, priklausomai ar atliekamas kairinis, arba dešininis aerodromo ratas, sukamasi 90° kampu nuo kiltinės linijos (2.11 pav., 1).

Toliau tęsiamas kilimas 65–75 kt (120–140 km/h) greičiu, kol pasiekiamas 1200 ft (366 m) aukštis ir ties tašku (2) vėl sukamasi 90° kampu ta pačia kryptimi. Aerodromo rato grįžtinėje skrydis tęsiamas išlaikant pastovius skrydžio parametrus: 80–90 kt (~150–170 km/h) greitį, aukštį ir grįžtinės kursą.

Aerodromo rato 3-ojo posūkio vieta nustatoma, kai tarp orlaivio vietos ir KTT slenksčio susidaro 45° kampas (2.12 pav.). Atlikus 3-įjį posūkį, orlaivio greitis sumažinamas iki 70 kt (130 km/h) bei nustatoma užsparnių svirtis į 10° . Iki 4-ojo posūkio nužemėjama iki 800–900 ft (244–274 m) aukščio ir, atlikus 4-ąjį posūkį, nustatoma užsparnių padėtis dažniausiai 20° , rečiau 30° arba labai retai 40° (priklauso nuo užduoties). Toliau išlaikant 65 kt (120 km/h) (jei nėra vėjo, 60 kt (111 km/h)) tūpimo greitį, žemėjama orientuojantis pagal KTT slenkstį. Esant šoniniui vėjui, pilotas privalo kompensuoti vėjo nuonašą, kad išlaikytų nurodytą skrydžio trajektoriją.

Skrydžio maršrutu skersiniai trajektorijos nuokrypiai (STN) (angl. *XTE* – *Cross-track error*) yra apibrėžti RNP reikalavimais, tačiau mokslinėje literatūroje leistinas skrydžio tikslumas rate nėra tiksliai apibrėžtas. Oro uostų prieigose nurodytas skrydžio nuokrypis yra 1 NM (1852 m), o artėjimo zonos – 0,3 NM (556 m), tačiau tai yra pakankamai didelė paklaida, nes panaudojus aerodromo rato modelį, matyti, kad daugelio pilotų skrydžio aerodromo ratai gali įtilpti į ± 150 m skersinius nuokrypius (jei imama po vieną ratą ir jie lyginami modelyje).

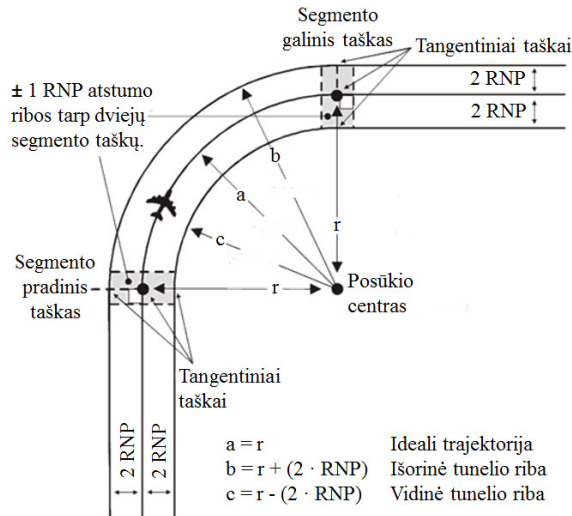
Aerodromo rato modelio sudarymas. Pilotų skrydžio vertinimas – tai daugiaparametrinis uždavinys. Skrydžio metu, pilotas turi atlikti keturias iš anksto nurodytas užduotis (Lacabanne 2012): valdyti, naviguoti, bendrauti, stebėti.



2.12 pav. Ketvirtas aerodromo rato posūkis

Fig. 2.12. Forth turn of traffic circuit

Aerodromo rato posūkiai sudaryti remiantis 2.13 paveikslo schema. Naudojant Matlab 2015a programinę įrangą, yra įgyvendintas aerodromo rato programinis modelis, kurio idėjos eskizas (2.14 pav.) publikuotas 2013 m. (Masiulionis 2013). Šiuo modeliu, iš išvardintų punktų, galime vertinti tik piloto orlaivio valdymą ir navigaciją, tačiau kitus piloto įgūdžius turi vertinti pats instruktorius arba turėtų būti sukurtos daug sudėtingesnės sistemos, kurios vertintų pilotų atliekamus veiksmus naudojant papildomus jutiklius pilotų kabinoje ar encefalografijos metodus, kuriais būtų tiriama piloto smegenų veikla.

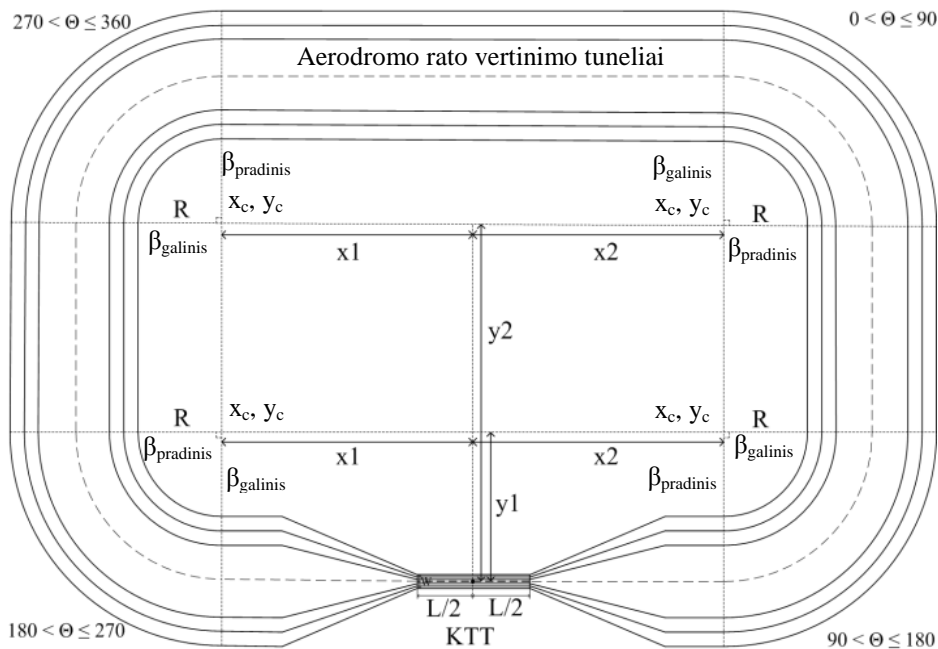


2.13 pav. Spindulys į praskridimo tašką schema (ICAO 2009; Herndon 2008)

Fig. 2.13. Radius to fix turn construction (ICAO 2009; Herndon 2008)

Pasirėmus realių skrydžių praktikos duomenų tendencijomis, šio darbo autoriaus sukurtas universalus aerodromo rato vertinimo programinis modelis (2.14 pav.), kurio trajektorijos ir tuneliai sudaryti iš tiesių linijų bei lankų segmentų, suformuojant trajektorijų posūkius, kuriuose orlaivis turėtų skristi neviršydamas maksimalių posvyrio kampų ir nurodytu greičiu. Jo universalumas pasižymi tuo, kad jame galima nustatyti įvairius aerodromo rato parametrus ir jo vertinimo tunelius suprojektuoti ant bet kurio aerodromo nurodžius KTT centro koordinatas. Taip pat įvedami kiti KTT parametrai: ilgis, plotis bei kursas. Toliau įvedami trijų aerodromo rato vertinimo tunelių pločiai (vidiniojo, viduriniojo ir išorinio tunelių) bei aerodromo vertinimo rato ilgis (2 parametrai): kiltinės ir tūptinės ilgis (x_1 ir x_2). Šių parametų atstumai skiriasi (paprastai realių skrydžių kiltinės atstumas iki KTT centro būna trumpesnis, o tūptinės – ilgesnis). Be to, nurodomas ir aerodromo vertinimo rato plotis (2 parametrai): y_1 – pirminis plotis (jis taip pat apibrėžia ir aerodromo vertinimo rato visų posūkių spindulio R dydį) ir y_2 – antrinis plotis, kuriuo nustatomas pagrindinis aerodromo vertinimo rato plotis.

Remiantis apibrėžtais parametrais, atliekami tarpiniai skaičiavimai, kuriuose skaičiuojami aerodromo rato posūkių centrai bei jų lankų formavimo taškai. Toliau atliekamas apskaičiuotų skrydžio tarpinių taškų pasukimas pagal KTT kryptį ir atliekamas šių taškų sujungimas linijomis. Dėl gausybės programiniame kode atliekamų kintamųjų skaičiavimų, 2.15 paveiksle pateikiamas tik svarbiausius skaičiavimo procesus parodantis algoritmas.

**2.14 pav.** Pirminis aerodromo vertinimo rato eskizas**Fig. 2.14.** Original sketch of flight assessment circuit

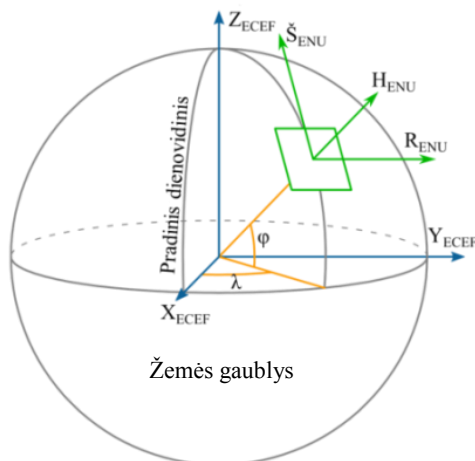
Norint paprasčiau atlikti skaičiavimus, visas aerodromo ratas programuotas naudojantis stačiakampėmis plokštuminėmis koordinatėmis, o realių skrydžių GNSS (angl. *Global navigation satellite system*) duomenų geografinės WGS-84 koordinatės transformuojamos į stačiakampes plokštumines koordinatas, kad būtų įmanoma pavaizduoti realius skrydžius ir aerodromo vertinimo ratą viename grafike. Dėl geresnio vaizdumo, skrydžiai išskirti į horizontalią ir vertikalią plokštumas.

Pirminis aerodromo rato variantas buvo sukurtas transformavus realių skrydžių duomenis į ECEF (angl. *Earth-centered earth-fixed*) (Kaya 2005) koordinačių sistemą (2.17 pav.). Kadangi šių koordinačių pradžia yra Žemės centras, todėl x ir y ašių koordinatės išreiškiamos labai dideliais skaičiais, kuriais sudėtinga įvertinti skrydžio atstumus. Nepaisant to, po koordinačių transformacijos, visa skrydžio trajektorija tampa persisukusi 180° kampu prieš laikrodžio rodyklę ir nebeatitinka tikrosios KTT krypties. Sukurtam skrydžio vertinimo modeliui tai įtakos neturi, kadangi pakeitus jo pasukimo kampą, galima priderinti jį prie esamos skrydžio trajektorijos.



2.15 pav. Supaprastintas aerodromo vertinimo rato sudarymo algoritmas

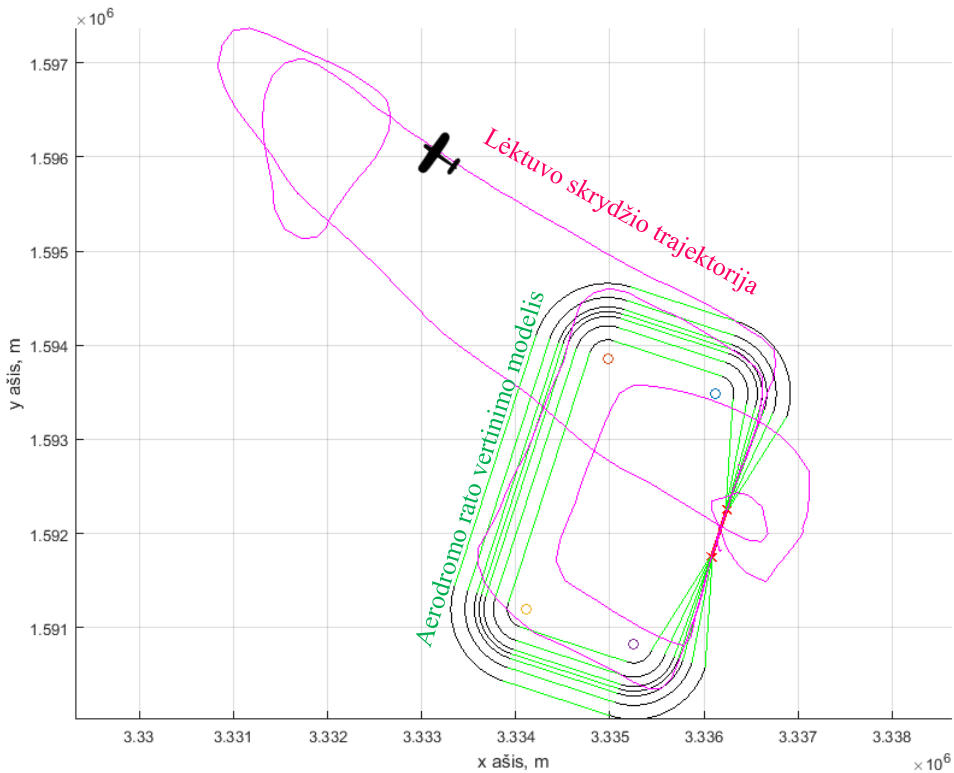
Fig. 2.15. Simplified algorithm of traffic assessment circuit modeling



2.16 pav. Geocentrinį ir vietinių plokštuminių koordinacių palyginimas (Cai 2011)

Fig. 2.16. Comparison of geocentric and local cartesian coordinate systems (Cai 2011)

Norint išvengti didelių koordinacių skaičių ir neteisingos realių skrydžių krypties, nuspręsta pereiti prie kitos koordinacių sistemos naudojimo. Tam atvejui panaudota ENU (angl. *East north up*) koordinacių sistema (2.16 pav.), kuri išsprendė prieš tai kilusias problemas. Jose nustatytas geografinis atraminis taškas tampa ENU koordinacių sistemos atskaitos tašku (x_0, y_0, z_0) . Mūsų pasirinktu atveju, aerodromo rato vertinimo modelyje koordinacių pradžią priskyrėme KTT centrui (2.18 pav.), todėl tapo lengviau vaizdžiai apskaičiuoti aerodromo rato atstumus, nutolusius nuo aerodromo. Nuo KTT centro orlaivio skrydis vaizduojamas plokštuminių stačiakampių koordinacių sistemoje.



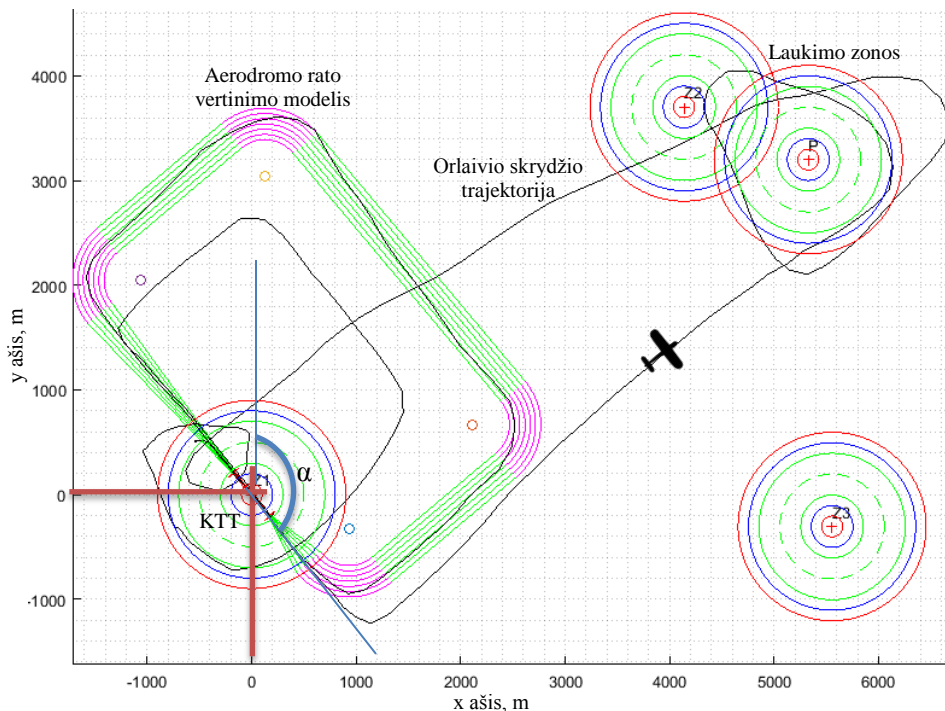
2.17 pav. Pilotų aerodromo rato įvertinimo programinis modelis
geocentrinėje koordinatės sistemoje

Fig. 2.17. Programming model of assessment of pilot traffic circuit in
geocentric coordinate system

Suprojektuota pradinė nepasukto (0°) aerodromo vertinimo rato kryptis yra lygiagreti x ašiai (2.19 pav.). Tam, kad ją būtų galima priderinti prie bet kurio aerodromo KTT kilimo ir tępimo kurso, reikalinga įvesti naudojamo aerodromo KTT kursą. Šiam tikslui naudojamas koordinatės pasukimas aplink pasirinktą tašką (mūsų atveju šis taškas yra KTT centro koordinatės), aplink kurį sukami visi aerodromo vertinimo rato atraminiai taškai. Aerodromo vertinimo rato atraminių taškų koordinatės pasukimui naudojama lygčių sistema (2.1):

$$\begin{cases} x_{rot} = x_c + \cos(\alpha) \cdot (x - x_c) - \sin(\alpha) \cdot (y - y_c) \\ y_{rot} = y_c + \sin(\alpha) \cdot (x - x_c) + \cos(\alpha) \cdot (y - y_c) \end{cases} \quad (2.1)$$

čia x_{rot} , y_{rot} – pasuktos (perskaičiuotos) taško koordinatės; x_c , y_c – centro taško koordinatės, aplink kurį sukami kiti taškai; x , y – sukamojo taško pradinės koordinatės; α – pasukimo kampas, radianais (2.18 pav.).



2.18 pav. Aerodromo ratas su laukimo zonomis vietinėje plokštuminėje koordinatinių sistemoje

Fig. 2.18. Traffic circuit with holding zones in local cartesian coordinate system

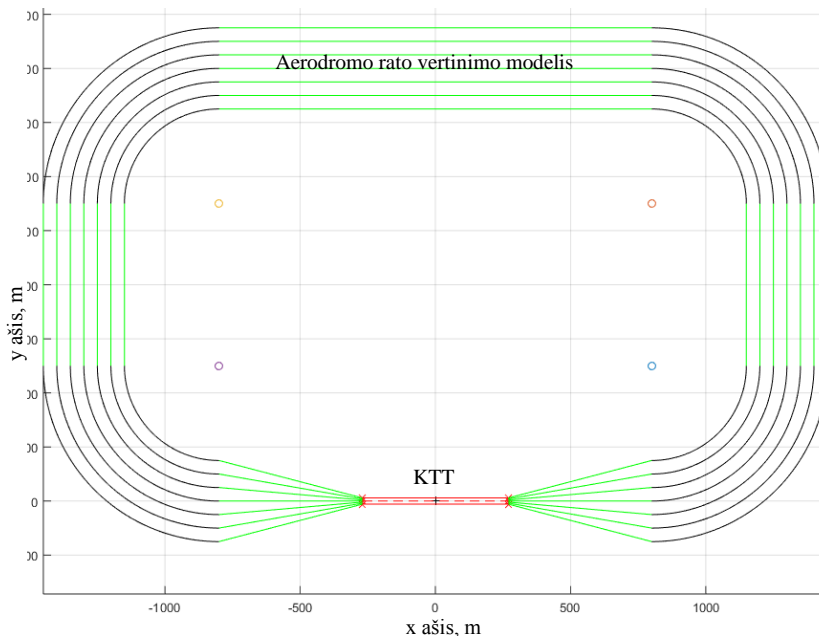
Aerodromo rato posūkių lankų braižymui naudojama lygčių sistema (2.2):

$$\begin{cases} x = R \cdot \cos(\beta) + x_c \\ y = R \cdot \sin(\beta) + y_c \end{cases} \quad (2.2)$$

čia x , y – lanko taško koordinatės; x_c , y_c – lanko centro koordinatės; R – lanko spindulys; β – kampų eilė nuo pradinio iki galinio kampo (aerodromo rato formuojamo posūkio pradinis ir galinis kampas turi tenkinti sąlygą $\beta_{\text{galinis}} - \beta_{\text{pradinis}} = 90^\circ$) priklausantys nuo aerodromo rato pasukimo kampo α , formuojančių x ir y koordinates, pagal kurias kreivėmis braižomi aerodromo rato posūkiai, o laukimo zonų β kampų eilė yra nuo 0° iki 360° , radianais (2.14 pav.).

Esant pasuktam aerodromo vertinimo ratui, atitinkamai pagal pasukimo kampą reikia pasukti ir aerodromo vertinimo rato posūkio lankus. Pagal lygčių sistemą (2.1), apskaičiuojamas posūkio lanko pradinis kampas ir nustatomas lanko pradinio taško koordinatės. Kadangi posūkio lankai sudaro stačius kampus, tai lanko galinis kampas nustatomas automatiškai: lanko pradinis

kampas $+90^\circ$ ir toliau apskaičiuojamos lanko galinio taško koordinatės. Galiausiai, visi apskaičiuoti atraminiai taškai sujungiami tiesiomis linijomis.



2.19 pav. Nepasukto aerodromo rato programinis modelis

Fig. 2.19. Unrotated traffic circuit computer model

Tokiu būdu, gaunamas visiškai funkcionuojantis aerodromo rato piloto skrydžio vertinimo modelis.

Lėktuvo piloto aerodromo rato aukštingumo vertinimas. Vertinant piloto skrydį aerodromo rate, reikia kreipti dėmesį ne tik į horizontalius nuokrypius, bet ir kaip pilotas geba išlaikyti nurodytą aukštį vertinant orlaivio vertikaliosius nuokrypius. 2.20 paveiksle matyti aerodromo rato aukštingumo diagramą iš 3.4 paveiksle pavaizduoto realaus orlaivio skrydžio.

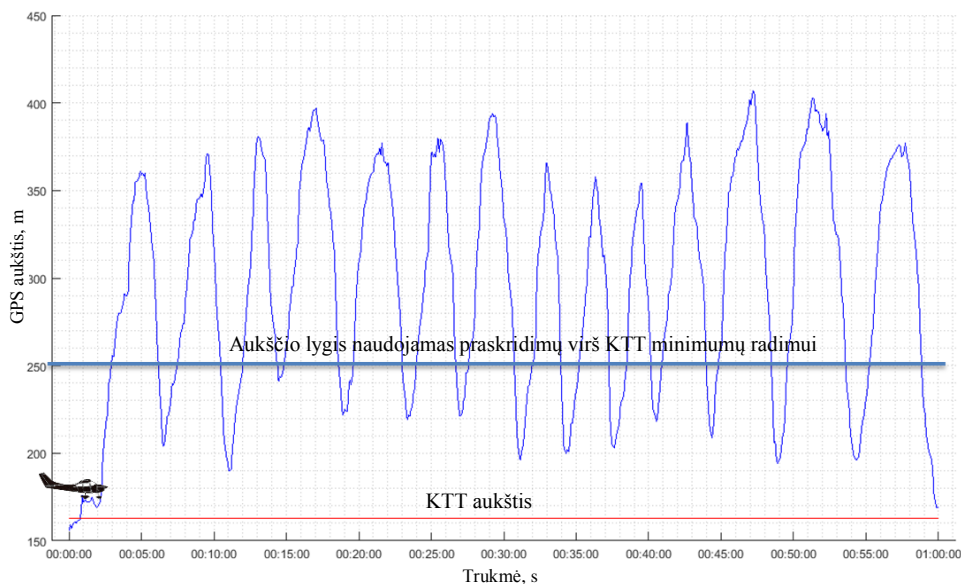
Aukštingumo diagramoje svarbu pažymėti KTT aukštį (2.20 pav.), kad būtų galima palyginti aukštį ne pagal menamą jūros lygį (MSL), o nuo KTT aukščio. Šiuo atveju orlaivio pilotas vykdė (27–77 m aukštyje virš KTT) praskridimus virš KTT netupdant orlaivio.

Paprastai, aukštingumo duomenys pateikiami laiko arba atstumo ašyje. GPS imtuvo pateikiamas UTC laikas nėra tiek aktualus, kiek skrydžio laiko trukmė. Todėl pradinis esamo skrydžio t_{UTC} laikas pakeičiamas į skrydžio trukmės pradžią, pvz., $t_{UTCn} - t_{UTC0} = t_{tr}$, čia t_{UTCn} – tolimesnio skrydžio taško UTC laikas; t_{tr} – skrydžio trukmė. 2.20 paveikslo x ašyje pateikiamas vienos valandos trukmės skrydis, kurio metu pilotas atliko 14-ą aerodromo ratų.

Vietoj laiko trukmės, ašyje gali būti vaizduojamas skrydžio atstumas. Galimi keli atstumo skaičiavimo variantai. Ortodrominis atstumas gali būti apskaičiuotas naudojant geografines koordinates nuo taško $A(\varphi_1, \lambda_1)$ iki taško $B(\varphi_2, \lambda_2)$ sumuojant atstumus pagal (2.3) formulę (Eddie 2012):

$$d(A, B) = 2r \cdot \arcsin \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \sin^2 \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2} \right)}, \quad (2.3)$$

čia r – Žemės spindulys; φ_1, φ_2 – A ir B taškų platumos koordinatės; λ_1, λ_2 – A ir B taškų ilgumos koordinatės.



2.20 pav. 14-os aerodromo ratų aukštingumas

Fig. 2.20. Altitude of forthteen traffic circuits

Arba, transformavus iš geografinių į stačiakampes plokštumines koordinates, atstumas gali būti matuojamas skaičiuojant trikampio įžambinę naudojant Pitagoro teoremą. Susumavus visų trikampių įžambinių dydžius, gaunamas visas skrydžio atstumas.

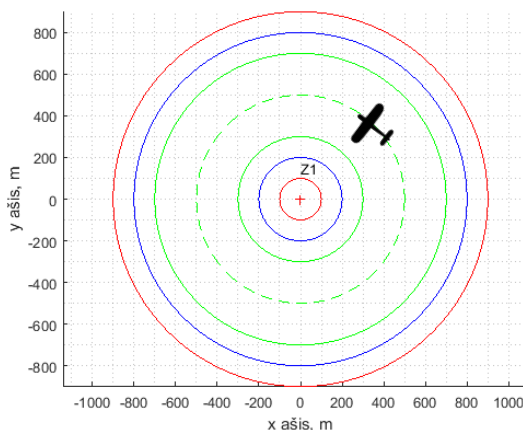
Su atstumo skaičiavimo formule (2.3) taip pat galima skaičiuoti ne tik realų orlaivio skrydžio atstumą, bet taip pat ir idealųjį aerodromo rato atstumą, kad instruktorius galėtų šiuos dydžius tarpusavyje palyginti.

Taigi, atsižvelgiant tiek į horizontalias, tiek į vertikalias lėktuvo trajektorijas, gali būti atliekama detali piloto skrydžio tikslumo analizė.

2.3.3. Lėktuvo piloto laukimo zonų trajektorijų tikslumo vertinimo programiniai modeliai

Šiame poskyryje sumodeliuoti keli laukimo zonos skrydžio užduočių vertinimo modeliai: skrydis ratu laukimo zonoje ir aštuoniukės formos skrydis.

2.18 paveiksle, šalia aerodromo rato, sumodeliuotos laukimo zonos (Z1, Z2, Z3 ir P – papildoma) taip pat su trimis skrydžio vertinimo tuneliais, kurie leidžia įvertinti, kaip lėktuvo pilotai geba išlaikyti taisyklingos formos laukimo zonos skrydžio apskritimą aplink apibrėžtą tašką. Trijų tunelių suformavimui reikia 7-ių apskritimų, kurių sudarymui panaudota ta pati lygtis (2.2), kuri buvo naudojama posūkių sudarymui. Tačiau vietoje 90° kampo būtina naudoti 360° kampą, kad gautume visą apskritimą. Laukimo zonos (2.21 pav.) tunelių sudarymo funkcijai reikalinga nurodyti 7 parametrus: laukimo zonos centro koordinatės (x , y); idealios trajektorijos apskritimo spindulys, trijų tunelių plotčiai ir laukimo zonos pavadinimas. Tas pats laukimo zonos skrydžio vertinimo modelis gali būti naudojamas vertinant sraigasparnio piloto skrydį sukinio užduotyje.

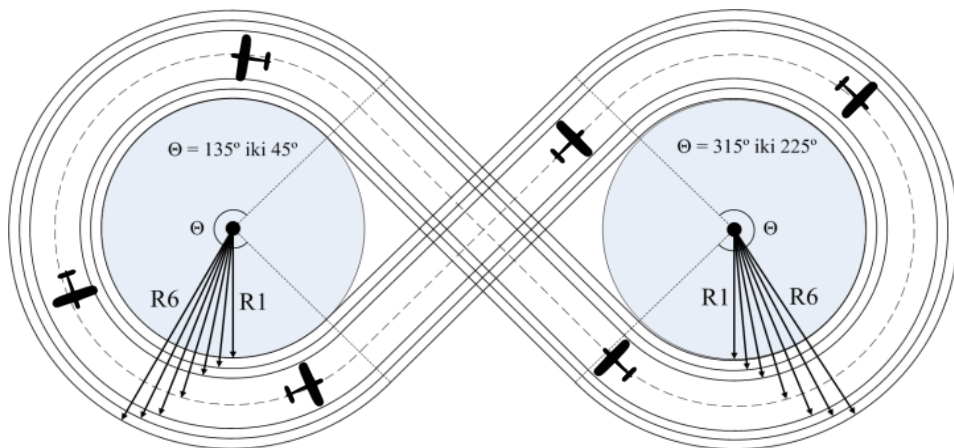


2.21 pav. Laukimo zonos modelis

Fig. 2.21. Model of holding pattern

2.22 paveiksle pasiūlytas (Masiulionis 2013) dar vienas piloto skrydžio įvertinimo modelis, kuriame pilotas turi atlikti aštuoniukės formos skrydžio užduotį tarp dviejų nurodytų objektų, pvz., kaminų, kaimų, bažnyčių, vandens bokštų. Šioje užduotyje pilotai treniruoja valdyti iš karto keletą orlaivio skrydžio parametrų (orlaivio greitis, tolygaus posvyrio išlaikymas naudojantis posvyrio ir aukščio vairu), kad atliktų tolygius virazus. Skirtumas nuo laukimo zonoje atliekamų skrydžio apskritimų toks, kad pilotas turi koncentruotis ne ties vienu objektu, o nuolat stebėti ir modeliuoti savo orlaivio padėtį tarp dviejų

objektų. Skrydžio užduotį sudaro tiek kreivaeigio, tiek tiesiaeigio judėjimo dalys. Kaip ir aerodromo ratą, aštuoniukės vertinimo modelį sudaro trys vertinimo tuneliai.



2.22 pav. Kairinio ir dešiniojo viražo skrydžio vertinimo tunelio sluoksnius

Fig. 2.22. Layout of left and right turn assessment flight tunnel

Pagal Masiulionis (2013) pasiūlyto modelio sudarymo reikalavimus, kartu su Alejandro J. suprogramuotas realus veikiantis modelis Matlab terpėje su grafinė vartotojo sąsaja (angl. *GUI – Graphical user interface*) (2.23 pav.). Norint pilotui sudaryti tokios formos užduotį, būtina iš anksto įvesti devynis aštuoniukės formos modelio parametrus: pirmojo ir antrojo objekto x ir y ašies koordinatas, trijų vertinimo tunelių pločius, lankų spindulio dydis bei sluoksniavimo parametras (įjungta arba išjungta). Sluoksniavimas skirtas norint sudaryti daugiau, negu tarp dviejų objektų aštuoniukės formos skrydžio užduotį. Aštuoniukės formos Matlab modelyje (2.23 pav.) sudarytos visos galimos skrydžio trajektorijos tarp keturių objektų taikant trajektorijų sluoksniavimą. Taip pat galimos ir kitokios aštuoniukių kombinacijos, pvz., jas jungiant vorele. Tuomet pilotas galėtų skristi nuosekliai pereinant iš vienos aštuoniukės į kitą.

Sudarytoje skrydžio užduotyje (2.23 pav.) automatizuotai apskaičiuojami lankai, kurie atitinkamai pasukti pagal įvestas objektų koordinatas. Keičiant objektų koordinatas, tuo pačiu kinta ir atstumas tarp objektų. Esant objektams arčiau arba toliau, kinta lankų kampai, kurie jungiasi su tiesėmis. Norint automatizuoti glotnų lankų ir tiesių sujungimą, programiniame kode sudaryta atstumų ir kampų skalė, pagal kurią, esant tam tikram atstumui tarp objektų, parenkami atitinkami lankų kampai. Aštuoniukės modelio glotnus perėjimas iš apskritiminio į tiesųjį tunelį leidžia tinkamai vertinti lėktuvo piloto skrydžio tikslumą.

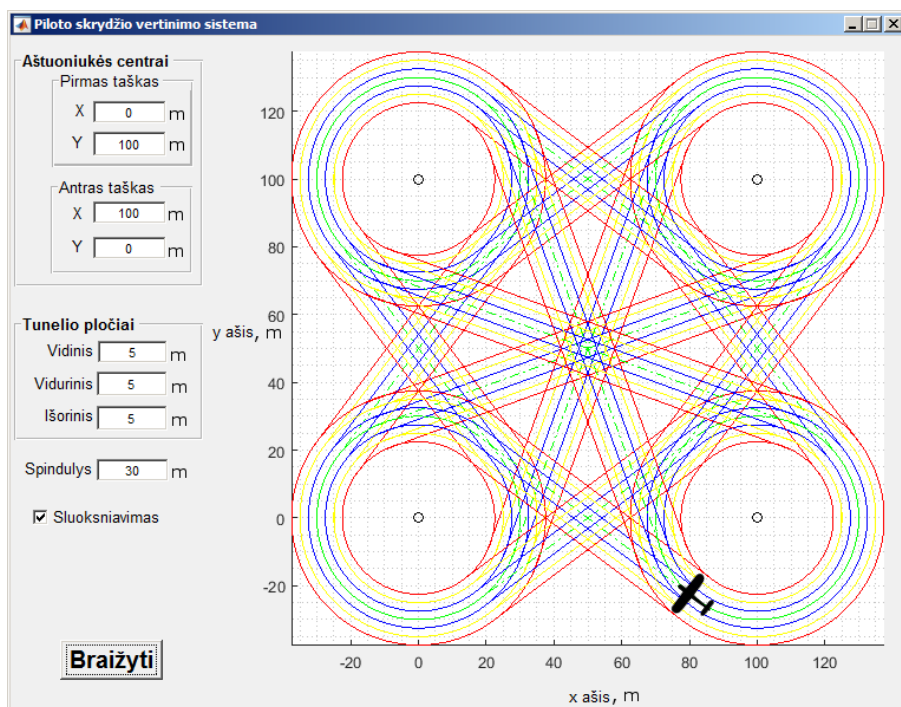


Fig. 2.23. Eight form flight task in Matlab environment
2.23 pav. Aštuoneto formos skrydžio užduotis Matlab aplinkoje

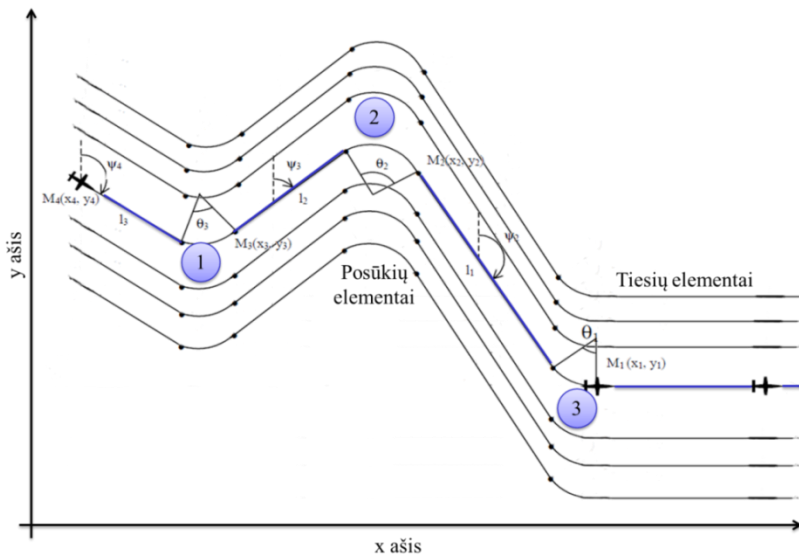
Be to, programiniame kode įgyvendintas vartotojo įvedamų modelio parametrų tikrinimas, kuris neleidžia įvesti netinkamus modelio parametrus, pvz., jei aštuoniukės modelio lanko spinduliai tampa didesni už pusės atstumo dydį tarp nurodytų objektų, kad nesusikirstų apskritimai ir visos tiesės su lankais jungtųsi tolygiai.

2.3.4. Lėktuvo piloto skrydžio maršruto trajektorijos tikslumo vertinimo programinis modelis

Pilotai, įgudę atlikti užduotis aerodromo zonoje, vėliau jiems leidžiama išskristi į maršrutinį skrydį pagal iš anksto sudarytą planą. Paprastai skrydžio planą sudaro informacija apie pilotą ir jo orlaivį bei visi pagrindiniai planuojamo maršrutinio skrydžio duomenys: išvykimo vieta ir laikas; skrydžio aukštis, greitis ir apskaičiuota trukmė; skrydžio maršrutas bei atvykimo vieta. Skrydžio maršrutą gali sudaryti oro uostų/aerodromų ICAO identifikacijos kodai, miestų pavadinimai, oro navigacijos praskridimo taškai (regioniniai/aukštuminiai). Kiekvienas iš jų gali būti apibrėžtas geografinėmis koordinatėmis. Maršrutinis

skrydis gali būti su grįžimu į pakilimo vietą arba numatytas tūpimas kitoje vietoje. Pilotas maršrutinio skrydžio trajektoriją gali planuoti per įvairius objektus arba per praskridimo taškus.

Iš aukščiau pateikto aprašo, galima matyti, kad pilotai gali susidaryti įvairias skrydžio trajektorijų konfigūracijas, todėl yra būtina taikyti automatizuotus skrydžio trajektorijų sudarymo metodus, kurie leistų tiksliai vertinti pilotų skrydžius, nepriklausomai nuo jų pasirinkto maršruto. Taip pat, kaip ir aerodromo ratui, būtina taikyti trijų lygių skrydžio vertinimo tunelius.



2.24 pav. Skrydžio maršruto trajektorijų modelio sudarymas naudojant tieses ir lankus (Shahzad 2000)

Fig. 2.24. Creation of the en-route flight trajectory model using straight lines and arcs (Shahzad 2000)

Shahzad (2000), orlaivio skrydžio trajektorijai modeliuoti, taikė tiesių ir apskritimo lankų elementus. Remiantis jo trajektorijų posūkių geometrinių kampų skaičiavimais, 2.24 paveiksle iškėlėme tokio maršrutinio skrydžio vertinimo tunelio idėją. Tokiu būdu galima automatizuoti skrydžio vertinimo trajektorijų sudarymą maršrutiniame skrydyje pagal iš anksto nurodytas praskridimo taškų koordinatas. Skrydžio maršruto posūkių kampai apskaičiuojami taikant trigonometrines funkcijas pagal tris nurodytas praskridimo taškų koordinatas. Žinodami trijų praskridimo taškų stačiakampes plokštumines koordinatas, galima apsiskaičiuoti atstumus tarp praskridimo taškų, taikant Euklido atstumo skaičiavimo formulę tarp dviejų žinomų taškų, leisianti apskaičiuoti nurodyto skrydžio maršruto atstumą:

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (2.4)$$

čia D – atstumas; x_1, y_1 – pirmojo praskridimo taško koordinatės; x_2, y_2 – antrojo praskridimo taško koordinatės.

Toliau būtina apskaičiuoti posūkio lankų centrus, apibrėžti posūkių spindulį bei atitinkamų vertinimo tunelių pločius. Tačiau, maršrutinio skrydžio skirtingų kampų posūkiuose sudėtinga nustatyti, kokio reikės posūkio spindulio, nes, priklausomai nuo posūkio kampo, kinta ir lanko spindulys, pagal kurį geriausiai atitiktų tikrąjį lėktuvo skrydį posūkyje.

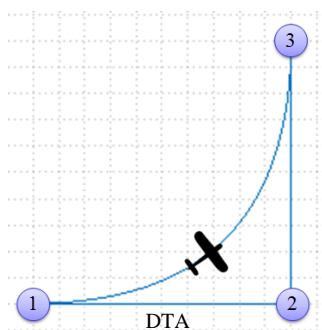
Vietoje apskritimo lankų, maršrutinio skrydžio tunelio posūkiams formuoti, nuspręsta taikyti Bezje trajektorijas (angl. *Bezier curve*). Tuomet posūkių sudarymui apskaičiuojamos ne lankų centro koordinatės, o pagal žinomas praskridimo taško koordinates. Apskaičiuojamos Bezje kreivės lanko pradžios ir pabaigos koordinatės, kurios visada yra ant tiesiosios linijos tarp kitų nurodytų praskridimo taškų.

Formuojant tunelį, būtina nurodyti atstumą, kuriuo bus parenkamas atitinkamas maršrutinio skrydžio posūkių lanko ilgis, pagal kurį suformuojamas tinkamas posūkio lankas lėčiau arba greičiau skrendantiems lėktuvams.

Minėtą atstumą ICAO apibrėžia, kaip posūkio numatytąjį atstumą (angl. *DTA – Distance to anticipation*), kuris 2.25 paveiksle yra nuo 1 iki 2 taško ir apibrėžia atstumą nuo praskridimo taško, kuomet lėktuvas turi pradėti posūkį nuo vienos tiesiosios iki kitos. Toks pats atstumas naudojamas ir tarp 2 ir 3 taško. Pagal nurodytą atstumą, apskaičiuojamos atraminių taškų 1 ir 3 koordinatės. Turint trijų taškų koordinates, galima išbrėžti Bezje kreives. Naudojantis Narasimhan (2014) suprogramuota Bezje kreivių sudarymo funkcija Matlab terpėje, nubraižytas orlaivio skrydžio 90° posūkis pagal nurodytas 1, 2 ir 3 taškų koordinates (2.25 pav.).

Toliau bus detalizuojami maršrutinio skrydžio vertinimo tunelio sudarymo metodai, bei pateikiamas maršrutinio skrydžio sudarymo supaprastintas algoritmas (2.26 pav.).

Kaip ir aerodromo rato, taip ir maršrutinio skrydžio tunelio modelio programos pradžioje nustatomi tunelio pagrindiniai parametrai: DTA parametras, tunelio trijų lygių pločiai ir nuskaitomi iš anksto nurodyti praskridimo taškai iš CSV (angl. *Comma separated values*) rinkmenos, kurioje yra saugoma informacija apie skrydžio maršrutą (praskridimo taškų pavadinimai bei šių taškų platumos ir ilgumos koordinatės).



2.25 pav. Bezje kreive sudarytas skrydžio posūkis

Fig. 2.25. Flight turn created with Bezier curve

2.1 lentelėje matyti tunelio praskridimo taškų CSV rinkmenos duomenų struktūra iš 2.30 paveiksle pateikto maršrutinio skrydžio. Toliau apskaičiuojamas įvestų praskridimo taškų skaičius ir tiek kartų vykdomi ciklai, kurių metu geografinės koordinatės transformuojamos į stačiakampes plokštumines koordinates ir jos parodomos grafike.

2.1 lentelė. Skrydžio maršrutu praskridimo taškų duomenų struktūra CSV rinkmenoje
Table 2.1. En-route flight data structure of waypoints in CSV file

Praskridimo taškai	Platuma	Ilguma
Start	54,692589	25,517807
Taurija	54,737222	25,556111
AukBez	54,803797	25,592878
GEKBI	54,883611	25,406930
MURUN	55,479722	24,977778
VESAM	55,892778	23,645556
URUBA	55,891667	23,147222
TOTRA	55,443056	22,771111
DETIG	54,583611	23,259444
RAVPO	54,886111	24,220000
ELEKA	54,800556	24,688889
LEDVI	54,637500	25,135000
EPINI	54,613889	25,431667
Finish	54,653523	25,529904

Toliau seka kampų skaičiavimai. Lyginant aerodromo rato tunelio modelį, kurio posūkių kampai yra visada statūs, maršrutinio skrydžio tunelių posūkliai visada sudaro nevienodus kampus tarp praskridimo taškų. Posūkių kampų skaičiavimui imami iš eilės po tris duotus praskridimo taškų koordinates, taikant Matlab funkciją (2.5):

$$WPalfa = \text{atan2d}(\text{abs}(\det([WP1 - WP2; WP3 - WP2])), \text{dot}(WP1 - WP2, WP3 - WP2)), \quad (2.5)$$

čia $WPalfa$ – posūkio kampas tarp trijų praskridimo taškų (2.30 paveiksle skaičiuojami kampai pažymėti $\alpha_1 \dots \alpha_{14}$), išreikštas laipsniais; $WP1$, $WP2$ ir $WP3$ – praskridimo taškų koordinatės, kurios apibrėžiamos išraiška (x, y) (2.30 pav.); atan2d – Matlab keturių kvadrantų arktangento (angl. *Four-quadrant inverse tangent*) funkcija, išreiškianti rezultatą laipsniais; abs – Matlab funkcija, išreiškianti koordinatžių taškus absoliučiaisiais skaičiais; det – Matlab funkcija, skaičiuojanti determinantą; dot – Matlab funkcija, skaičiuojanti skalarinę sandaugą.

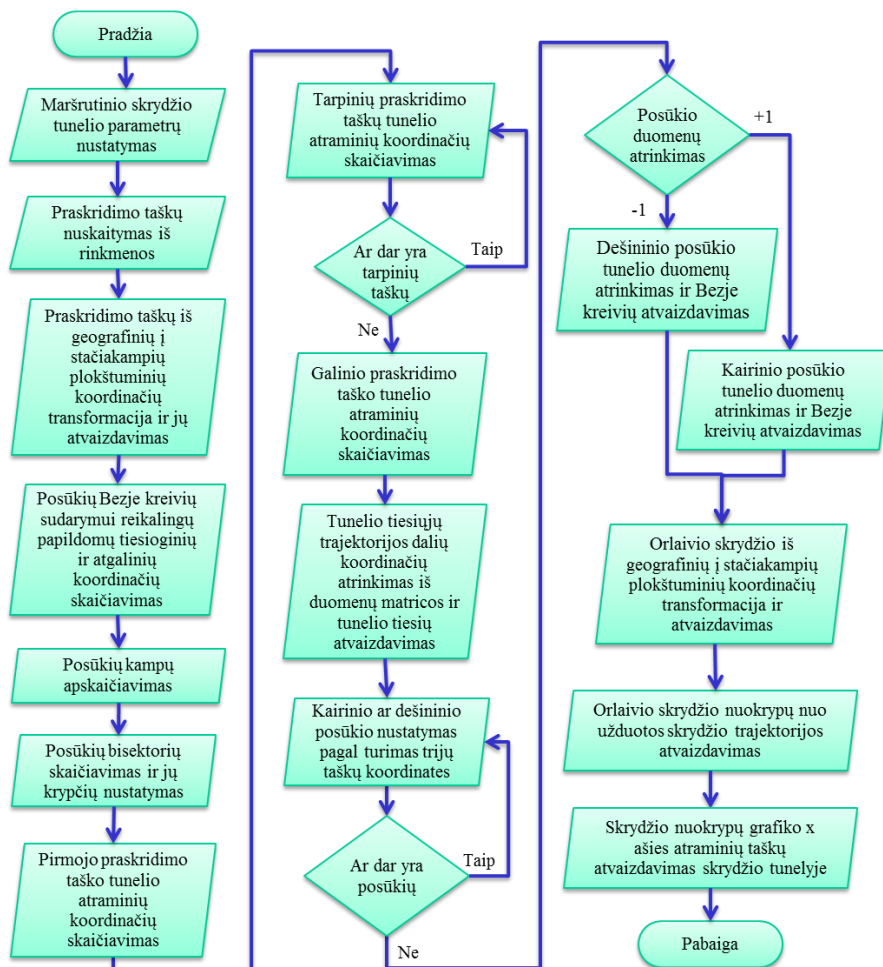
Skrydžio vertinimo trajektorija modeliuojama iš tiesių ir lankų, tam būtina apskaičiuoti tarpinių taškų (2.27 pav.) koordinates, kurios nurodo, kur braižomos tiesės, o kur posūkių lankai. Kaip ir aerodromo rate, naudojama formulė (2.2),

kuri apskaičiuoja naujo taško koordinatas pagal turimas praskridimo taško koordinatas, atstumą ir kryptį tarp praskridimo taškų. Tam būtina apskaičiuoti atgalinę (2.25 pav., $1 \leftarrow 2$) ir tiesioginę ($2 \rightarrow 3$) kryptį. Tiesioginės ir atgalinės krypties skaičiavimui, atitinkamai taikomos (2.6) ir (2.7) Matlab funkcijos:

$$kr_t = \text{atan2d}(y2 - y1, x2 - x1), \quad (2.6)$$

$$kr_a = \text{atan2d}(y1 - y2, x1 - x2), \quad (2.7)$$

čia kr_t , kr_a – tiesioginė ir atgalinė kryptis, išreikšta laipsniais; atan2d – Matlab keturių kvadrantų arktangento funkcija, išreikšta laipsniais; $x1$, $y1$ ir $x2$, $y2$ – pirmojo ir antrojo praskridimo taškų koordinatės.



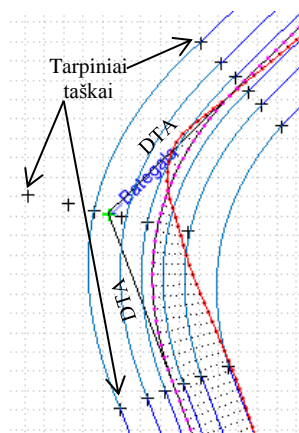
2.26 pav. Supaprastintas maršrutinio skrydžio sudarymo algoritmas
Fig. 2.26. Simplified algorithm of en-route flight modelling

Posūkių sudarymui būtina apskaičiuoti bisektoriaus kampą (pusės kampo kryptį). Tam naudojama Matlab funkcija `circirc` (analogiška Matlab funkcija yra `crossfix`, kuri skaičiuoja geografines susikirtimo taškų koordinates), kuri pagal duotas dviejų apskritimų koordinates ir jų spindulio ilgius apskaičiuoja dviejų apskritimų susikirtimo koordinates. Apskritimai visada susikerta dviejuose taškuose, tačiau nežinomas kuris yra kuris. Tačiau suprojektuota taip, kad vienas iš susikirtimo taškų visada kerta praskridimo taško koordinates (2.28 pav.), nes apskritimų centrų koordinatės parinktos ant prieš tai skaičiuotų tiesioginių ir atgalinių taškų, ir apskritimų spinduliai sutampa su DTA atstumu. Kad atpažinti taškus, yra įvedama sąlygos funkcija, kuri tikrina, kuris sankirtos taškas kerta praskridimo tašką. Bisektoriaus krypties nustatymui naudojama (2.6) Matlab funkcija.

Visos apskaičiuotos skrydžio vertinimo tunelio atraminės koordinatės yra saugomos duomenų matricoje (2.29 pav). Nelyginėse matricos eilutėse saugomos x koordinatės (pažymėta pilkos spalvos fonu), o lyginėse – y koordinatės (violetinės spalvos fone). Stulpeliuose saugomi skrydžio tunelio vertinimo lygių atraminių taškų koordinatės. Pirmajame stulpelyje saugomi vidiniojo (oranžinės spalvos rėmeliai), antrajame – viduriniojo (žalios spalvos rėmeliai), trečiajame – išorinio tunelio atraminių taškų koordinatės (raudonos spalvos rėmeliai).

Jei matricos eilutė turi daugiau stulpelių, tai saugomų duomenų eiliškumas kartoja. Pirmose keturiose matricos eilutėse saugomos pirmojo praskridimo taško tunelio atraminių taškų koordinatės, kurios užima tris stulpelius. Nuo 5-os iki 12-os eilutės saugomos tarpinės praskridimo taškų galinės ir priekinės Bezje kreivių vaizdavimui reikalingos tunelio koordinatės. Šių eilučių stulpelių skaičius priklauso nuo įvestų praskridimo taškų skaičiaus ir atėmus pirmąjį ir paskutinįjį praskridimo tašką. Galinės koordinatės (13–16 eilutės) taip pat suformuojamos, kaip ir pirmasis taškas, ir užima taip pat tris stulpelius. 17–20 eilutėse saugomos praskridimo taškų vidurinės Bezje kreivių vaizdavimui reikalingos tunelio atraminių taškų koordinatės.

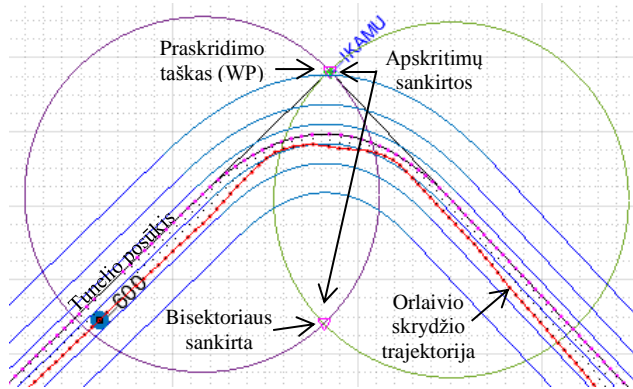
Siekiant, kad nebūtų sugadinamas duomenų eiliškumas dėl matricos paskutinėje eilutėje atsirandančio nulio, sukurta papildoma 21 eilutė, kurioje paliekamas nereikalingas nulis ir ši eilutė lieka nenaudojama. Taip pat visi kiti



2.27 pav. Atraminiai tunelio taškai

Fig. 2.27. Reference points of tunnel

likę nuliai taip pat nenaudojami skaičiavimuose. Jie reikalingi tik visos matricos stulpelių elementų skaičiaus suvienodinimui.



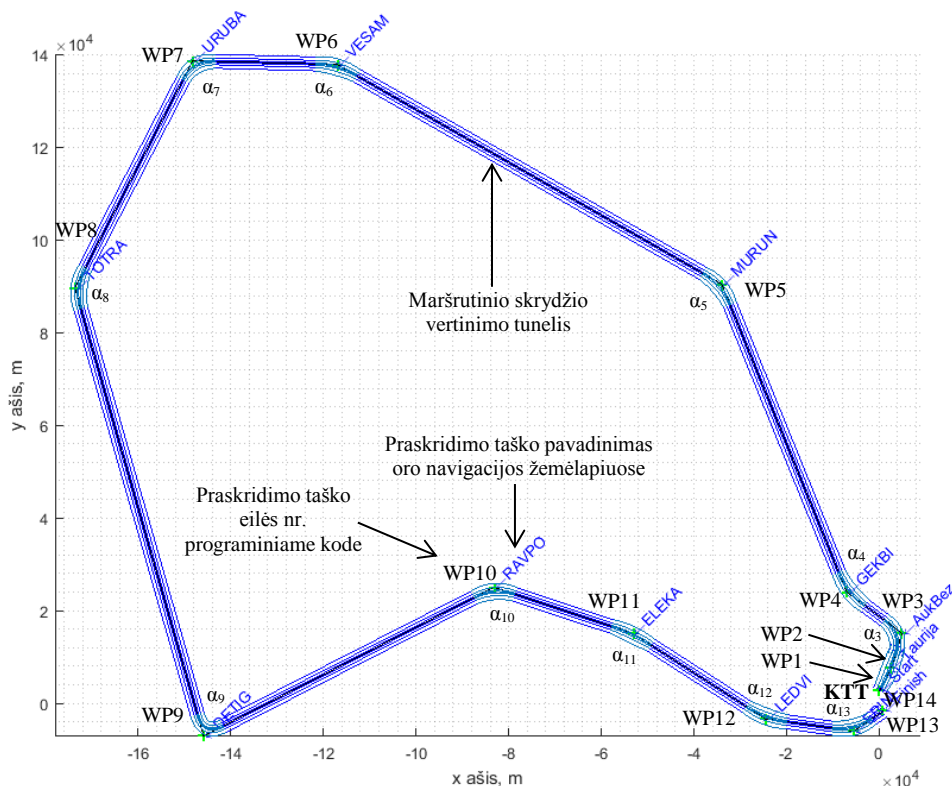
2.28 pav. Posūkio bisektoriaus suradimo metodas

Fig. 2.28. Finding method of turn bisector

Vidinis	Vidurinis	Išorinis										
-5406,04	-5336,45	-5232,07	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-5786,02	-5290,83	-4548,18	1-ojo praskridimo taško tunelio koordinatės					Tarpinių praskridimo taškų tunelio Bezje kreivių pradinių ir galinių taškų koordinatės				
-5475,63	-5355,57	-5649,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-6281,15	-6776,29	-7518,99	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-19806,8	-19737,2	-19632,8	-49015,2	-48744,6	-48338,8	-78529,7	-78371,8	-78134,9	x	Kairės pusės		
-3762,11	-3266,98	-2524,28	12670,21	13090,67	13721,37	23757,46	24231,87	24943,47	y			
-19876,3	-19945,9	-20050,3	-49285,8	-49556,4	-49962,2	-78687,6	-78845,5	-79082,4	x	Dešinės pusės		
-4257,24	-4752,33	-5495,08	12249,74	11829,23	11198,58	23283,06	22808,65	22097,05	y			
-10228,9	-10402,9	-10402,9	-28766,6	-28766,6	-29443	-57820,2	-57820,2	-58215	x			
-5613,12	-6108,25	-6850,95	-954,397	-1374,86	-2005,56	16336,36	15861,95	15150,35	y			
-10159,3	-10089,7	-9985,36	-28496	-28225,4	-27819,6	-57662,3	-57504,4	-57267,5	x			
-5117,98	-4622,85	-3880,15	-533,931	-113,465	517,2342	16810,76	17285,16	17996,77	y			
-83084	-82926	-82689,1	Galinio praskridimo taško tunelio koordinatės					Tunelio tarpinių praskridimo taškų Bezje kreivių centrinių taškų koordinatės				
25273,57	2347,9	26459,58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-83241,9	-83399,3	-83636,7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
24799,17	24324,76	23613,16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
-24471,7	-24225,4	-23856,1	-53339,7	-53645,1	-54103,1	-83498,4	-84169,3	-85175,7				
-3010,22	-2347,33	-1353,12	14738,57	14100,31	13144,17	25148,04	25371,38	25706,4				
-24718	-24700,6	-25333,6	-53034,3	-52270,8	-52270,8	-83498,4	-83498,4	-85175,7				
-3673,06	-4335,9	-5330,16	15376,33	16014,09	16970,74	25148,04	25371,38	25706,4				
0	2	3	4	3	4	5	4	5	6			

2.29 pav. Maršrutinio skrydžio vertinimo tunelio 5-ių praskridimo taškų koordinatės matrica

Fig. 2.29. Coordinate matrix of 5 waypoints en-route flight assessment tunnel



2.30 pav. Skrydžio maršrutu vertinimo tunelio modelis

Fig. 2.30. Assessment tunnel model of en-route flight

Posūkių sudarymui, būtina nustatyti, į kurią pusę turi būti atliekamas tunelio posūkis (į kairę arba į dešinę) ir pagal tai turi būti atrinktos atitinkamos posūkio koordinatės. Posūkio kryptis nustatoma pagal tris praskridimo taškus ir šiam tikslui naudojamos (2.8) ir (2.9) Matlab funkcijos:

$$kr = \text{cross}([x_2 - x_1, y_2 - y_1, 0], [x_3 - x_1, y_3 - y_1, 0]); \quad (2.8)$$

$$kryptis = \text{sign}(kr(3)), \quad (2.9)$$

čia *cross* – Matlab funkcija, apskaičiuojanti vektorių, kuris sudarytas iš kitų dviejų vektorių; x_1, y_1 – pirmo praskridimo taško koordinatė; x_2, y_2 – antro praskridimo taško koordinatė; x_3, y_3 – trečio praskridimo taško koordinatė; *sign* – Matlab funkcija, kuri atpažįsta duomenų masyvo trečiojo elemento *kr*(3) rezultato reikšmės ženklą (jei $kr > 0$, tai *kryptis* = +1; jei $kr = 0$, tai *kryptis* = 0; jei $kr < 0$, tai *kryptis* = -1).

Toliau, pagal sąlygas, atitinkamai parenkamos posūkio tunelio koordinatės. Jei *kryptis* = +1, tai parenkamos kairinio posūkio koordinatės; jei *kryptis* = -1

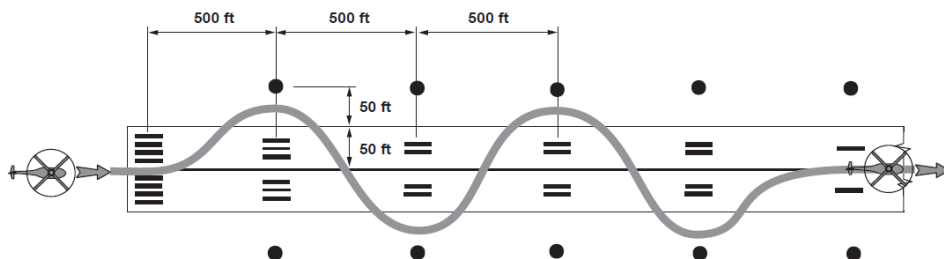
arba 0, tai parenkamos dešiniojo posūkio koordinatės. Galiausiai parodomas visas automatizuotas maršrutinio skrydžio vertinimo tunelio modelis (2.30 pav.).

Panaudojus aprašytus automatizuotų vertinimo tunelių modeliavimo metodus ir kompiuteriui pateikus lėktuvo skrydžio trajektoriją, instruktorius gali lengvai sudaryti bet kokio maršrutinio skrydžio užduotis ir pagal jas tinkamai įvertinti piloto skrydžio tikslumą.

2.3.5. Sraigtasparnio piloto slalomo skrydžio trajektorijų vertinimo modelis

Ši skrydžio užduotis gali būti analizuojama taikant Fitso dėsnį, kurį mokslininkas pristatė 1954 metais. (Fitts 1954), ir plačiai taikomas kompiuterinėse sistemose.

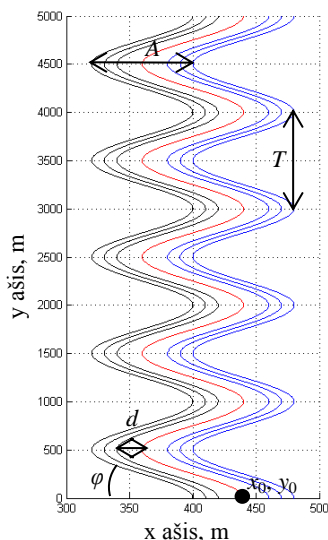
Fitts (1954) teigė, kad peršokimui tarp dviejų apibrėžtų zonų reikalingas laikas bus tuo mažesnis, kuo tarp jų atstumas bus mažesnis, o abiejų zonų plotas bus didesnis, ir atvirkščiai. Dabar šis dėsnis taikomas aeronautikos tyrimuose, ypač sraigtasparnio skrydžio slalomo užduotyse, vertinant tiek pilotų skrydžio gebėjimus bei valdymo strategiją, tiek sraigtasparnio valdymo charakteristikoms tirti.



2.31 pav. Siūloma sraigtasparnio slalomo manevro trajektorija (AMCOM 2000)

Fig. 2.31. Suggested course of helicopter for slalom maneuver (AMCOM 2000)

Sraigtasparnis savo konstrukciniu požiūriu yra sudėtingas skraidantis aparatas ir reikalauja iš piloto specifinių valdymo įgūdžių. Kol sraigtasparnis kybo ore, tol visas valdymas gana paprastas. Tačiau vos tik pradėjus jam judėti, keičiasi jo valdymo charakteristikos dėl pagrindinio rotoriaus mentis aptekančio oro srauto. Nepaisant to, norint dinamiškai manevruoti tarp kliūčių, reikia aktyviai dirbti su vairalazde, pedalais ir traukos automato svirtimi, nes pakeitus vieną valdymo parametą, tuo pat metu išsibalansuoja kiti ir juos reikia nuolat kompensuoti, pvz., palenkus sraigtasparnio traukos vektoriaus kampą nuo vertikalios padėties link sraigtasparnio priekio, taip sraigtasparnis pereina nuo kybojimo į horizontalų judėjimą.



2.32 pav. Sraigtasparnio piloto skrydžio slalomo užduoties vertinimo tunelio modelis
Fig. 2.32. Model of pilot helicopter slalom task evaluation tunnel

Perkėlus dalį sraigtasparnio pilnutinės traukos iš vertikaliosios į horizontalią trauką, sumažėja sraigtasparnio keliamoji jėga, kurią reikia didinti, kad kompensuotųsi prarasta vertikalioji sraigtasparnio trauka. Tačiau padidinus sraigtasparnio trauką, tuo pat metu padidėja variklio sukimo momentas, kurį reikia kompensuoti uodegos sraigtu. Žinoma, sraigtasparnio stabilizavimo sistemos (angl. *SAS – Stability augmentation system*) padeda pilotui sumažinti darbo krūvį valdant sraigtasparnį.

2.31 paveiksle matyti, kad sraigtasparnio pilotų slalomo skrydžio trajektorijos yra artimos sinuso funkcijai. Remiantis šia funkcija, buvo sudarytas sraigtasparnio piloto slalomo skrydžio užduoties vertinimo tunelio matematinis (2.10) bei programinis modelis (2.33 pav.).

$$y(x) = A \sin\left(\varphi + \frac{2\pi y_0}{T}\right) \pm d \pm x_0, \quad (2.10)$$

čia A – sinusoidės amplitudė; φ – sinusoidės pradinė fazė; T – sinusoidės periodas (atstumas tarp sinusoidės maksimumų); d – amplitudės poslinkis; π – matematinė konstanta, išreiškianti apskritimo ilgio ir skersmens santykį; x_0 – pradinė tunelio x koordinatė; y_0 – pradinė tunelio y koordinatė.

2.32 paveikslo centrinė slalomo kreivė (kreivės pradžia pažymėta x_0, y_0) yra idealioji slalomo skrydžio trajektorija, o aplink ją esančiomis kreivėmis sukuriama skrydžio tuneliai, kuriais vertinamas skrydžio tikslumas.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

Atliekant tyrimą, sudaryta automatizuota orlaivių skrydžių tikslumo vertinimo metodika, kurią apima:

1. Sukurtas oro navigacijos žemėlapis Google Earth programinėje įrangoje, vizualiai parodantis instruktoriui atraminius praskridimo taškus, kur pilotas turėjo skristi, ir kur jis iš tiesų skrido. Šio žemėlapio veikimo principu galima kurti tikslesnes skrydžio vertinimo priemones Matlab terpėje.
2. Matlab terpėje sukurta matematinė priemonė, leidžianti instruktoriui modeliuoti visų orlaivio skrydžio etapų tikslumo kontrolei reikalingus tunelius, apimančius lėktuvo skrydžius aerodromo ratu, laukimo zonoje ir maršrutu, bei sraigtasparnio slalomo skrydžius vertinant jų nuokrypius nuo nurodytų skrydžio trajektorijos lygių.
3. Nustatyta, kad siekiant supaprastinti skrydžio modelių sudarymui reikalingus skaičiavimus, būtina atlikti skrydžio įrašų koordinatų transformaciją iš geografinių (WGS-84) į vietines stačiakampes plokštumines (ENU) koordinates.
4. Nustatyta, kad siekiant greitai ir lanksčiai pritaikyti modelį prie bet kurio pasaulio aerodromo KTT kurso, būtina taikyti aerodromo rato modelio koordinatų sistemos pasukimus ir taip sutapdinti modelį su KTT išilgine ašimi.
5. Nustatyta, kad skrydžio aštuoniukės modeliui reikalinga naudoti specialią skaičių skalę, kuri priklausomai nuo atstumo tarp dviejų objektų, parenka atitinkamą lanko kampą, kad modelio lankai glotniai susijungtų su tiesėmis.
6. Nustatyta, kad modeliuojant maršrutinio skrydžio vertinimo tunelius, reikalinga taikyti metodiką, kuri sudaro galimybę kurti tunelius su besikeičiančiais posūkių kampais.

Orlaivio pilotų skrydžio trajektorijų vertinimo modelio taikymas eksperimentiniuose skrydžiuose

Antrajame skyriuje buvo kuriami piloto skrydžio vertinimo programiniai modeliai. Šiame skyriuje, jų atitikimas realiems skrydžio parametrams tikrinamas realiais eksperimentiniais skrydžiais, analizuojamos kylančios problemos ir pateikiami galimi jų sprendimo būdai. Eksperimentiniai skrydžiai atlikti naudojantis realiais lėktuvais Cessna 152, Cessna 172 ir Piper Seneca V PA-34-220T bei moksliniu sraigtasparnio skrydžio imituokliu. Atskiruose poskyriuose analizuojami lėktuvų aerodromo ratu, laukimo zonos ir skrydžio maršrutu eksperimentiniai rezultatai. Paskutiniajame šio skyriaus poskyryje pateikti sraigtasparnio pilotų slalomo skrydžių rezultatai gauti naudojantis moksliniu Airbus sraigtasparnio imituokliu. Skyriaus rezultatai publikuoti Aviation (Masiulionis 2016) ir Transport (Masiulionis 2017) žurnaluose.

3.1. Eksperimentinių tyrimų metodika ir matavimo įrangos parinkimas

Eksperimentinių tyrimų metodika. Atliekant eksperimentinius tyrimus pasirinkta žemiau pateikta tyrimų metodika:

1. eksperimentinių skrydžių duomenų surinkimas su GPS imtuvu Garmin GPSmap 78s, kuriuo gauti šie skrydžio duomenys: geografinių koordinačių ilguma ir platuma; aukštis nuo Žemės WGS-84 elipsoido; tikslus laikas. Apskaičiuojami išvestiniai duomenys: skrydžio greitis; kilimo ir žemėjimo greitis; skrydžio kursas; skrydžio atstumas; skrydžio trukmės. Slalomo užduotyje eksperimentinių duomenų surinkimui naudojamas sraigtasparnis Airbus EC225 skrydžio imituoklis;
2. skrydžio eksperimentinių duomenų nuskaitymas Matlab programinėje įrangoje ir jų vaizdavimas ENU koordinačių sistemoje bei žemėlapyje;
3. matematinis skrydžio tunelių modeliavimas ir vaizdavimas kartu su eksperimentiniais skrydžiais;
4. orlaivio skrydžio nuokrypių matavimas nuo idealios skrydžio tunelio trajektorijos;
5. skrydžio duomenų vertinimas: pastovus kilimas ir žemėjimas; aukščio ir greičio išlaikymas; nuokrypių matavimas nuo nurodytos trajektorijos.

Toliau pateikiamas pasirinktos matavimo įrangos aprašymas. Dauguma pasaulio mokslininkų tyrimus atlieka naudojantis skrydžio treniruokliais. Kadangi Vilniaus Gedimino technikos universiteto (VGTU) Antano Gustaičio aviacijos institute (AGAI) rengiami pilotai, kurie atlieka praktinius skrydžius su realiais orlaiviais (lėktuvais), todėl galima atlikti realius eksperimentinius skrydžio parametrų tyrimus.

3.1 lentelė. Eksperimentinių skrydžių padėties nustatymo įrangos parametrai

Table 3.1. Positioning equipment parameters of experimental flights

Parametrai	Reikšmės
Gamintojas ir modelis	Garmin GPSmap 78s
Horizontalus vietos nustatymo tikslumas	± 5 m 95 % veikimo laiko
Vertikalus vietos nustatymo tikslumas	± 3 m 95 % veikimo laiko
Aukščio apribojimai	nuo -610 m iki $+9144$ m
Koordinačių sistema	WGS-84
Šaltinis: Garmin GPSmap 78 series owner's	

Skrydžių analizei naudota Matlab 2015a duomenų apdorojimo ir skrydžio tunelių formavimo programinė įranga su Mapping toolbox paketu bei rankinis GPS imtuvas Garmin GPSmap 78s su barometriniu aukščiamačiu, kuriuo buvo įrašinėjami realių skrydžių duomenys į GPX formato rinkmeną praktinių

skrydžių metu. Pagal gautus eksperimentinių matavimų duomenis patikrinami sudaryti aerodromo rato, laukimo zonų ir maršrutinio skrydžio tikslumo vertinimo matematiniai modeliai. 3.1 lentelėje pateikti GPS imtuvo Garmin GPSmap 78s gamintojo deklaruojami parametrai.

Gautų duomenų patikimumas buvo tikrinamas dubliuojant skrydžio įrašus kitu GPS imtuvu Holux M215, kurio gamintojo deklaruojami parametrai pateikti 3.2 lentelėje. E priede pateikti abiejų minėtų GNSS imtuvų dubliuoti skrydžio įrašų duomenys (trajektorijos) bei jų fiksuotų padėčių atstumai tarp abiejų trajektorijų. Neįtraukus grubių matavimo paklaidų, bandymo metu tarp trajektorijų atstumas svyravo iki 15 m. Žinoma, tokiu palyginimo būdu gaunamos dvigubai didesnės reikšmės, negu deklaruoja GNSS imtuvų gamintojai. Taip atsitinka, kai vieno imtuvo vietos nustatymo reikšmė nuo tikrosios padėties maksimaliai nukrypus į vieną pusę, o kito imtuvo reikšmė atitinkamai nukrypus į priešingą pusę. Todėl padalinus iš dviejų gaunama, kad 7,5 m PSN vietos nustatymo paklaida galima užtikrinti realiąją orlaivio padėtį.

3.2 lentelė. Eksperimentinių skrydžių dubliuojančios padėties nustatymo įrangos parametrai

Table 3.2. Redundancy positioning equipment parameters of experimental flights

Parametrai	Reikšmės
Gamintojas ir modelis	Holux M215
Lustas	MTK
SBAS skirtuminės pataisos	EGNOS, WAAS, MSAS
L1 signalas, MHz	1575,42
C/A kodas, MHz	1,023
Padėties atnaujinimo dažnis, Hz	1
Aukščio apribojimas, m	<18000
Greičio apribojimas, km/h	<1854
Pagreičio apribojimas, G	<4
Virpesių pagreičio apribojimas, m/s ²	<20
Koordinatų sistema	WGS-84
Padėties nustatymas be DGPS, m (PSN –pusinio skritulio nuokrypio)	3
Padėties nustatymas su DGPS (95 % skrydžio laiko):	
• horizontalioje plokštumoje, m	<2,2
• vertikalioje plokštumoje, m	<5
NMEA 3.01 duomenų sparta:	
• bendroji duomenų sparta, b/s	4800
• GPGGA, Hz	1
• GPGSA, Hz	0,2
• GPRMC, Hz	1
• GPVTG, Hz	1

Šaltinis: Holux GPS receiver M215 user's guide, 2007

Tolesniam ir patikimesniam kuriamos vertinimo sistemos veikimui vien tik GNSS imtuvo nepakaktų, nes naudojantis GNSS imtuvu, galima išmatuoti skrydžio trajektoriją, aukštį Žemės elipsoido bei žemės greitį (angl. *GS* – *Ground speed*), o orlaivio pilotas greitį nustato pagal orlaivio orinį greitį (angl. *AS* – *Airspeed*). Paklaida tarp orinio greičio (kurį stebi pilotas orlaivio kabinoje) ir GNSS imtuvo tuo didesnė, kuo didesnis vėjas. Greičio parametrai itin svarbūs, kai orlaivis tupdomas. Tuo metu orlaivio saugaus tupdymo greitis ir smukos greitis (greitis, kurio nepakanka reikiamai orlaivio sparnų keliamajai jėgai sukurti) tampa labai artimi vienas kito. GNSS imtuvo matuojamas greitis gali turėti reikšmingos įtakos piloto vertinimui, jei GNSS imtuvo greičio parodymai taps mažesni už orlaivio smukos greitį. Taip gali atsitikti, kai orlaivis tūps tiesiogiai prieš vėją. Tuo metu, orlaivio orinio greičio matuoklis fiksuos orlaivio greitį ir priešpriešinio vėjo greitį. Tuo tarpu, GNSS imtuvas matuoja tik žemės greitį, kuris tuo atveju, bus mažesnis už orinį greitį. Šias greičio paklaidas iš dalies galėtų sumažinti pasirėmus meteorologine informacija apie konkrečioje vietovėje vyraujančio vėjo kryptį ir greitį. Tačiau tiksliausias būdas būtų prie GNSS imtuvo, kaip ir orlaivyje, papildomai naudoti Pitostatinus greičio matavimo jutiklius oriniui greičiui matuoti. Nepaisant to, pirminiams vertinimo modelių tinkamumo matavimams atlikti, GNSS imtuvo tikslumas buvo pakankamas, kurio vietos nustatymo paklaida vidutiniškai svyravo apie ± 5 m 95 % skrydžio laiko.

3.2. Modelio tyrimas lėktuvo aerodromo rato skrydyje

Eksperimentinio tyrimo tikslas – patikrinti sukurto aerodromo rato vertinimo modelio tinkamumą vertinant realių lėktuvo pilotų skrydžio tikslumą.

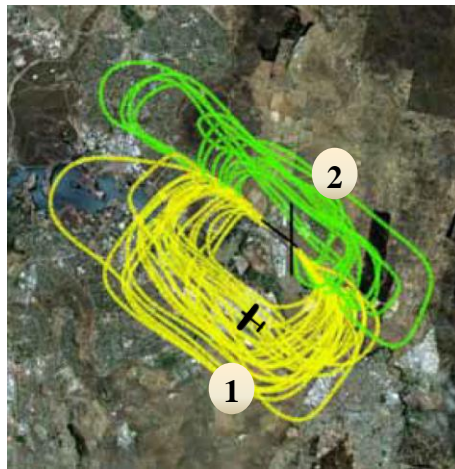
Eksperimento eiga ir analizė. Atlikta analizė, kaip realiosios aerodromo rato trajektorijos atitinka idealųjį aerodromo rato modelį. Kaip matyti iš literatūros šaltiniuose pateiktų realių (3.1 pav.) ir Airservices Australia Šiaurės-Pietų kryptimi vykdomu aerodromo ratų (3.2 pav.) (McConnell 2011) bei turimų realių praktinių mokomųjų skrydžio duomenų (3.3 pav.), pastebėta, kad pilotai neišlaiko tikslios aerodromo rato dėžutės formos. Taip pat pilotų mokymo eigoje kinta aerodromo rato dydis, kuris priklauso nuo lėktuvų, skraidančių tame pačiame rate, skaičiaus, kad būtų išlaikomas saugus atstumas tarp lėktuvų.

Visada taikyti didelius aerodromo ratus nėra tikslinga, kadangi tai apsunkina mokymo eigą. Aerodromo rato mokomųjų skrydžių užduoties tikslas yra, per paskirtą skrydžio valandą, atlikti kuo daugiau kilimų ir tūpimų su kuo mažesnėmis degalų sąnaudomis.

Šie veiksniai labai apsunkina automatizuotos skrydžio vertinimo sistemos kūrimą, kadangi nėra itin griežtų skrydžio tikslumo reikalavimų. Kuriant automatizuotą vertinimo sistemą, susiduriama su įvairiais iššūkiais:

- turint skrydžio vertinimo sistemą, bus reikalinga pakeisti pilotų skrydžio įpročius, t. y., jiems reikės atlikti idealios formos aerodromo ratus;
- vertinimo sistema turėtų būti dinamiška ir turėtų prisitaikyti prie kintančių skrydžio situacijų, pvz., padidėjusio lėktuvų kiekio rate ir keisti rato dydį, bei gebėti vertinti kelias užduotis vienu metu.

Iš 3.3 paveikslo matyti, kad aerodromo rate didelio skrydžio tikslumo reikalaujama KTT tūptinėje ir kiltinėje, kurias apriboja KTT plotis, todėl šioje tiesiojoje pilotas patiria didesnę darbo krūvį ir jam reikia tiksliau išlaikyti savo skrydžio trajektoriją tiek horizontalioje, tiek nuolat bekintančioje vertikaloje plokštumoje, kad nenukryptų nuo kiltinės arba tūptinės ribų.



3.1 pav. Įprasti aerodromo ratų nuokrypiai:

1 – kai vėjas pučia iš šiaurės; 2 – kai vėjas yra iš pietų pusės (McConnell 2011)

Fig. 3.1. Typical variations in circuit pattern:

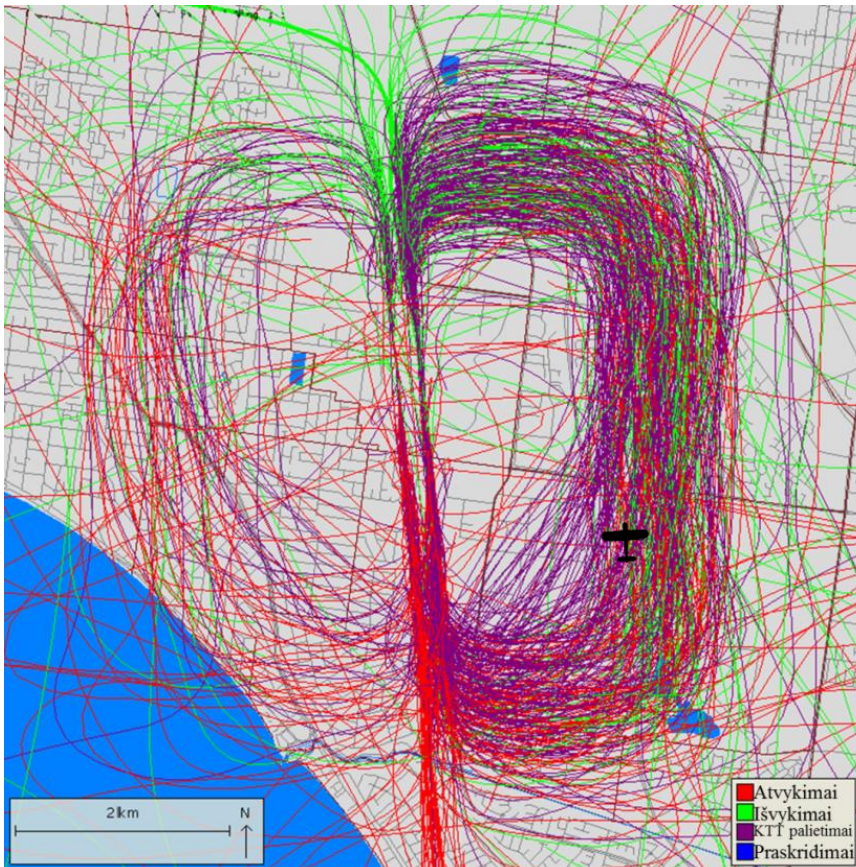
1 – when the wind is from the north;

2 – when the wind is from the south (McConnell 2011)

Atskirais atvejais, mažiau reikšmingiems praktinio skrydžio elementams laikas gali būti sutrumpinamas, kreipiant dėmesį tik į svarbiausius skrydžio elementus, pvz., aerodromo rate tūptimas ir kilimas yra svarbiausi užduoties vykdymo elementai. Todėl 3.2 paveiksle galima matyti skrydžio trajektorijas (pažymėtos violetine spalva), kuriose (remiantis 2.11 paveikslu) pakilus į nurodytą aukštį, atliekamas posūkis taške (1) ir, praleidus aerodromo rato taškus (2) ir (3), skrendama tiesiai link taško (4) įskrendant tiesiai į aerodromo rato baigiamąją dalį ir toliau užbaigiant likusias standartinio aerodromo rato dalis.

Skrydžio trajektorija gali būti parenkama trumpesnė pratybų metu, nes aerodromo rato grįžtinės dalis nesuteikia pilotui didelio darbo krūvio, nes šioje dalyje reikia išlaikyti tik stabilius skrydžio parametrus, pvz., greitį, aukštį, kursą.

O visuose kituose aerodromo rato dalyse svarbu stebėti papildomai ir skrydžio vertikalųjį aukštėjimo ir žemėjimo greitį, valdyti užsparnių, važiuoklės (jei valdoma) padėtis ir kt. Tam, kad aerodromo rato grįžtinės dalis taptų sudėtingesnė ir pažengęs pilotas būtų labiau paruošiamas skrydžiui maršrutu, siūloma įterpti du papildomus taškus, kuriuose studentas turėtų keisti skrydžio aukštį. Tokiu būdu būtų išlaikomas taisyklingos stačiakampio formos aerodromo ratas ir, tuo pačiu, būtų skraidoma pagal aiškiai nurodytą trajektoriją, pagal kurią galėtų vertinti automatizuota skrydžio vertinimo sistema.

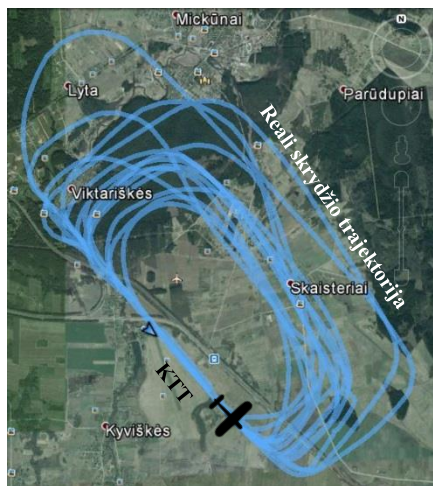


3.2 pav. Įprastiniai aerodromo ratai kilimo tępimo taku 17 (McConnell 2011)

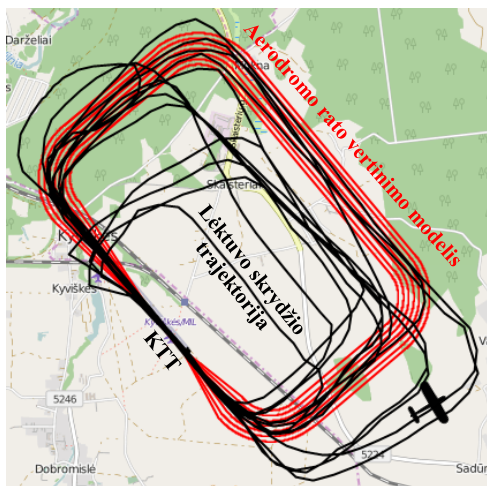
Fig. 3.2. Typical operations from Runway 17 (McConnell 2011)

Užduoties aiškumui pagerinti, aerodromo rato modelio užduotį galima pavaizduoti žemėlapyje. Matlab programiniame kode panaudojus wmline funkciją, aerodromo vertinimo ratą galima pavaizduoti viename iš kelių galimų Matlab integruotų žemėlapių (3.4 paveiksle naudojamas Open Street Map

žemėlapis, taip pat gali būti pasirinktas oro navigacijos žemėlapis, tačiau jis turi labai mažą raišką), kuriame galima palyginti skrydį su žemėje esančiais objektais: miškais, miesteliais, keliais, geležinkeliais, upėmis ir kt. Tai leidžia vizualiai suprasti, kokios yra leistinos skrydžio paklaidos ir ties kokiais objektais turėtų keisti skrydžio parametrus.



3.3 pav. Realio aerodromo rato trajektorija Kyviškių aerodrome
Fig. 3.3. Real traffic circuit trajectory in Kyviškės aerodrome



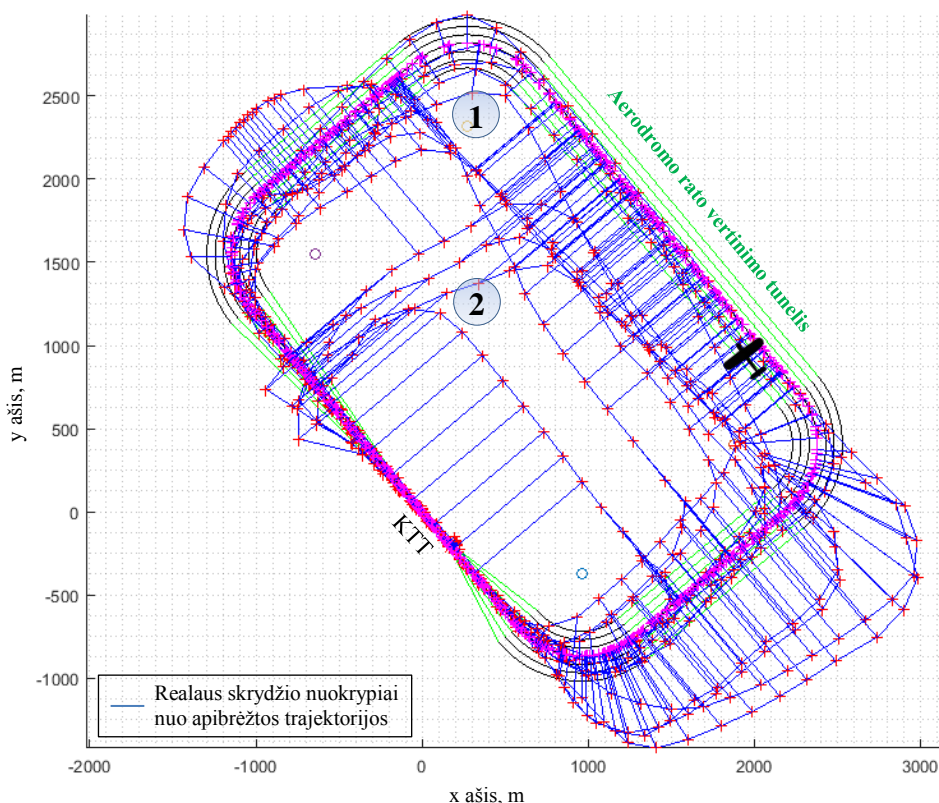
3.4 pav. Aerodromo rato modelis žemėlapyje 100, 200, ir 300 m pločio tuneliais ir realiu skrydžiu
Fig. 3.4. Traffic circuit model on the map with 100, 200 and 300 m width of tunnels and real flight

Pvz., pagal 3.4 paveiksle sudarytą aerodromo rato vertinimo tunelį, kurio parametrai pateikti 3.3 lentelėje, instruktorius nusakytų, kaip tiksliai, naudojantis esamais vietovės orientyrais, atlikti visus aerodromo rato elementus. Tai leistų pilotui tiksliai suskristi instruktoriaus nurodytą aerodromo ratą.

3.2.1. Lėktuvo piloto skrydžio trajektorijų nukrypimo nuo aerodromo rato modelio vertinimas

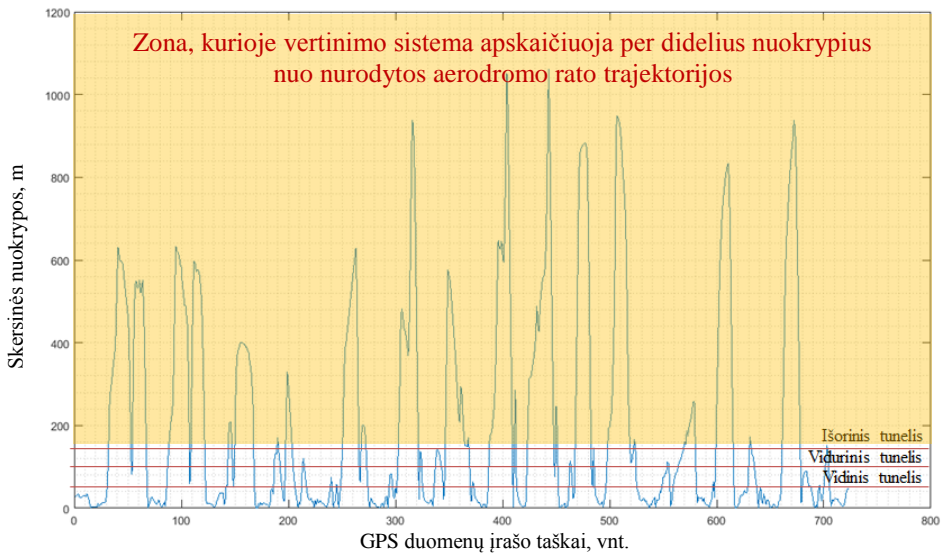
Eksperimentinio tyrimo tikslas – patikrinti nuokrypių matavimo funkcijos veikimo tinkamumą ir galimybes vertinant realių lėktuvo pilotų skrydžio tikslumą aerodromo rato tunelyje.

Eksperimento eiga ir analizė. Atliktas eksperimentinis aerodromo rato tyrimas virš Kyviškių aerodromo. C priedo C.1 lentelėje pateikti eksperimentui atlikti reikalingi aerodromo rato tunelio parametrai. Analizuojant sudarytą modelį matyti, kad kol kas galima skrydžius palyginti tik pagal aerodromo vertinimo rato trijų lygių tunelius. Tačiau tikslius nuokrypius yra sunku išmatuoti, kai realus skrydis nukrypsta už apibrėžtų tunelių ribų. Tikslių nuokrypų matavimui buvo pritaikyta D'Errico (2013) sukurta speciali Matlab nuokrypių matavimo funkcija, kuri, pagal nurodytus taškus, nustato artimiausius atstumus iki apibrėžtos formos figūros ar linijos, taip gaunant išmatuotas skrydžio skersinius nuokrypius. Eksperimentinių matavimų metu buvo nustatyta aerodromo vertinimo rato centrinė (idealią) trajektorijos linija ir gauti 3.5 ir 3.6 paveiksluose matomi skersinių nuokrypių matavimo rezultatai. 3.6 paveiksle pažymėtos horizontalios linijos atitinka vidinio, vidurinio ir išorinio tunelių nuokrypių ribas nuo idealiosios trajektorijos.



3.5 pav. Skrydžio nuokrypiai nuo nurodyto aerodromo rato
Fig. 3.5. Flight deviation from defined traffic circuit

3.6 paveiksle tunelių ribos vaizduojamos tiesėmis. Gauti dideli nuokrypiai, nes pilotas skrido laisvai – ne pagal matematiškai sukurtą aerodromo rato vertinimo modelį. 3.6 paveiksle matyti tik nuokrypių modulis, todėl neaišku, į kurią pusę nukrypo orlaivio trajektorija. Taip pat 3.6 paveiksle sudėtinga matyti, kuriose aerodromo rato vietose įvyko didžiausi nuokrypimai, todėl abu 3.5 ir 3.6 paveikslai vienas kitą papildo. Taip pat galima segmentuoti skrydžio etapus, kad būtų aiškiau matyti, kuriose vietose buvo tam tikros skrydžio paklaidos. Segmentus sudaro atitinkamos aerodromo rato dalys: kiltinė, toltinė, grįžtinė, baigiamoji ir tūptinė. Į atskirus segmentus būtų galima įtraukti aerodromo rato posūkius. Vienose segmentuose būtų matuojamas skrydžio tikslumas, kituose matuojama laiko trukmė iki pasiekto parametro, pvz., kiltinėje sudėtinga nustatyti, kurioje vietoje orlaivis pasieks nurodytą aukštį, nes minėta padėtis kinta priklausomai nuo vėjo greičio. Todėl kiltinėje pilotas turėtų pakilti iki nurodyto aukščio per nustatytą laiką.



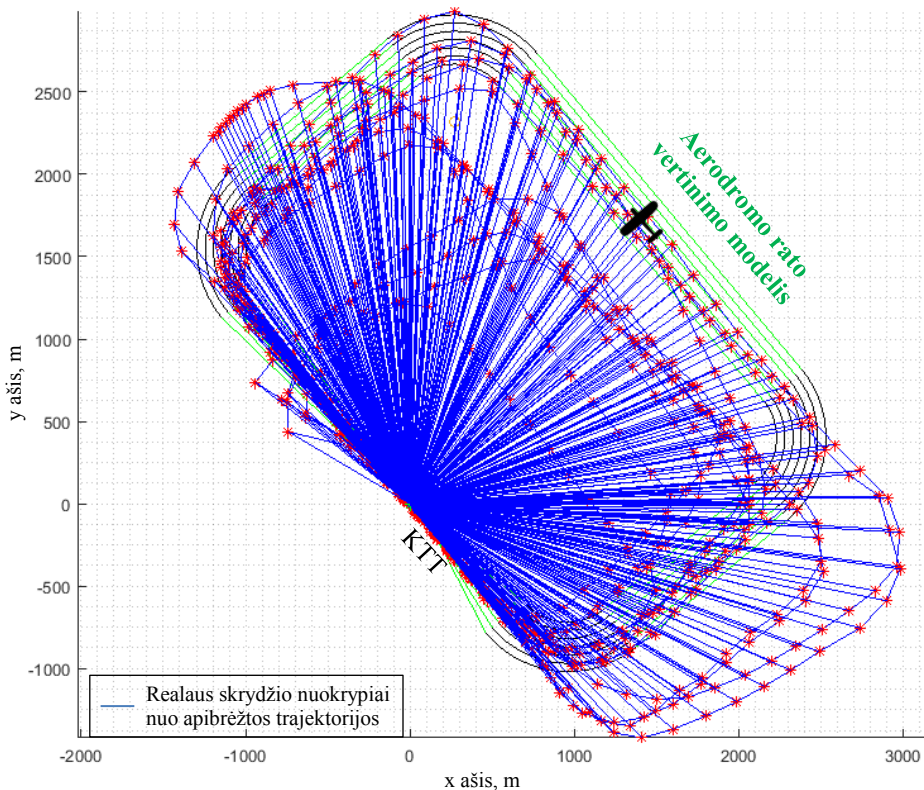
3.6 pav. Skrydžio nuokrypių priklausomybė nuo duomenų taškų

Fig. 3.6. Characteristics of flight deviation and data points

Naudojantis D'Errico (2013) skersinių nuokrypių matavimo funkcija, aerodromo rato išorinėje pusėje matavimo paklaidų nesusidaro dėl šuolių tarp aerodromo rato segmentų (3.5 pav.). Tačiau vidinėje aerodromo vertinimo rato pusėje atsiranda nuokrypių matavimo netikslumai ir paklaidos, kai orlaivis pernelyg nukrypsta nuo nurodytos trajektorijos. Pirmi netikslumai pasireiškia posūkiuose, kai orlaivis skrenda pernelyg nutolęs nuo nurodytos skrydžio trajektorijos vidinėje aerodromo vertinimo rato pusėje (3.5 pav., 1). Kadangi

skrydžio nuokrypis matuojamas pagal trumpiausią atstumą, tai posūkyje nutolus per daug nuo nurodytosios trajektorijos, artimiausias taškas apskaičiuojamas ne posūkio lanko linijoje, o aerodromo vertinimo rato tiesiosiose linijose. Tai aiškiai matoma 3.5 paveiksle., (1), kai nuokrypių linijos iš aerodromo rato grįžtinės tiesiosios trajektorijos staigiai peršoka į baigiamosios tiesiąją trajektoriją ir jokių nuokrypių trečiajame posūkio lanke nėra matuojama.

Antrosios matavimo paklaidos atsiranda, kai pilotas, viso aerodromo ratų atlikimo metu, keičia aerodromų ratų dydį. Tokiu metu net neįvyksta peršokimas iš vienos gretimos tiesiosios į kitą aerodromo rato tiesiąją, o įvyksta peršokimas į priešingos krypties aerodromo rato tiesiąją. Pvz., kaip matyti 3.5 paveiksle, (2), įvyksta peršokimas iš grįžtinės tiesiosios į tūptinės tiesiąją. 3.6 paveiksle šie peršokimai gali būti pastebimi pagal esančias dideles grafiko amplitudes.



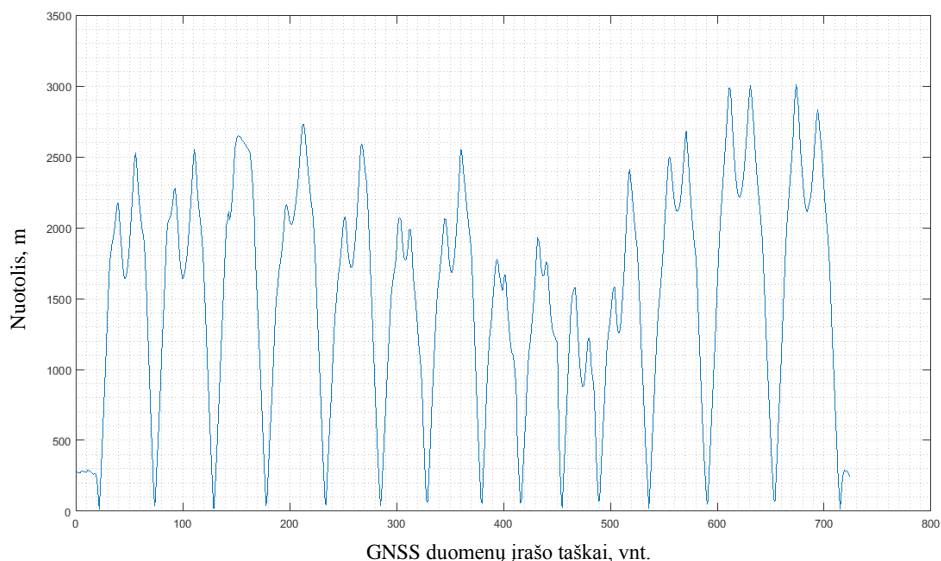
3.7 pav. Skrydžio atstumo matavimas nuo kilimo tūpimo tako centro

Fig. 3.7. Measurement of flight distance from runway center point

Norint išvengti minėtų netikslumų, paklaidų matavimui turi būti nurodyti leidžiami didžiausi skrydžio nuokrypiai, kuriuos viršijus, fiksuojamas neigiamas

piloto skrydžio vertinimas. Taip pat, skrydžio metu, pilotui neturėtų būti leidžiama keisti orlaivio aerodromo rato dydžio, kad neįvyktų minėti peršokimai.

Be skrydžio trajektorijos nuokrypių vertinimo aerodromo rate, atliktas tyrimas su skrydžio atstumo matavimu nuo KTT centro (3.7 pav.). 3.8 paveiksle gauti atstumo matavimo rezultatai, kuriuose matosi, kad orlaiviui apskridus vieną aerodromo ratą, pasiekiami du atstumo maksimumai – pirmas atstumo maksimumas pasiekiamas antrame posūkyje, o antras atstumo maksimumas pasiekiamas trečiame posūkyje. Tarp minėtų atstumų maksimumų, viršutinėje dalyje, gaunamos parabolės formos kreivės. Jeigu orlaivio aerodromo rato kiltinė yra trumpesnė už tūptinę, tai pirmasis atstumo maksimumas būna mažesnis už antrąjį.



3.8 pav. Skrydžio atstumo grafikas nuo kilimo ir tūpimo tako centro
Fig. 3.8. Diagram of flight distance from runway center point

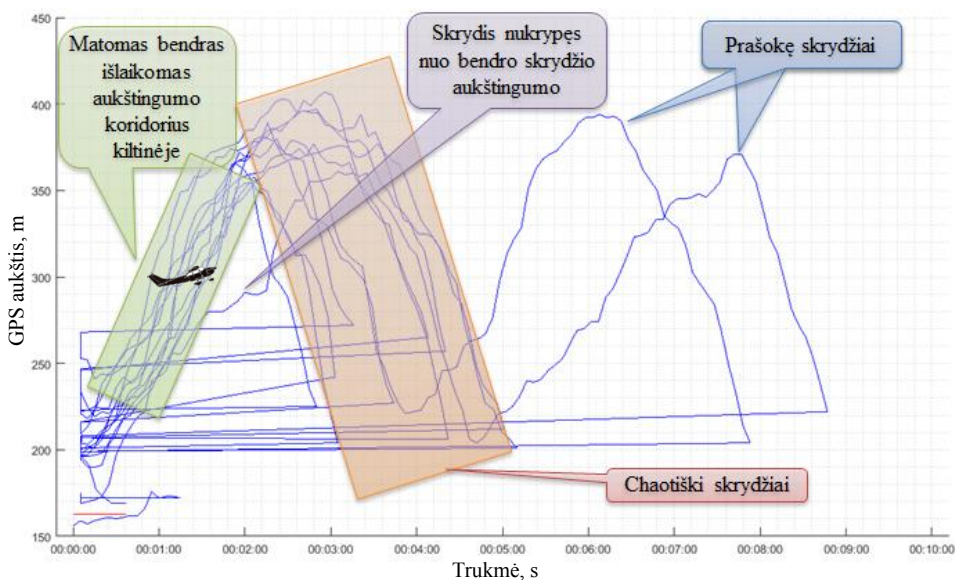
Remiantis šių aprašytų atstumų maksimumų forma ir jų amplitudė, galima nurodyti, ar kiltinės, ar tūptinės aerodromo rato dalis buvo ilgesnė. Taip pat, papildomai dar įskaičius ir grafiko amplitudę, galima įvertinti visų atliktų aerodromo ratų vientisumą (ar pilotas geba vienodai atkaroti savo skristus aerodromo ratus).

3.2.2. Lėktuvo piloto skrydžio aukštingumo vertinimas aerodromo ratuose

Eksperimentinio tyrimo tikslas – patikrinti Matlab funkcijos inpolygon veikimo tinkamumą ir galimybes sugretinant ir vertinant realių lėktuvo piloto skrydžius aerodromo rate.

Eksperimento eiga ir analizė. Stebint realių skrydžių duomenis, taip pat buvo analizuojamas ir skrydžių aukštingumas. 2.21 paveiksle galima matyti, kaip tolygiai buvo išlaikomas skrydžio aukštis skirtingų aerodromo ratų metu.

Tačiau, tokių aerodromo ratų aukštingumo kreivę sudėtinga tarpusavyje palyginti ir automatiškai vertinti, todėl tam reikalingas aerodromo ratų aukštingumo kreivių sugretinimas, kai po kiekvieno aerodromo rato, diagrama grąžinama į skrydžio trukmės ašies pradžią. Tam panaudota Matlab funkciją inpolygon, kuri tikrina, ar nurodytas taškas patenka į apibrėžtą zoną. Bandymo metu, triggerine zona pasirinktas KTT plotas, virš kurio praskridus orlaiviui, grąžinama aukštingumo kreivė į ašies pradžią ir toliau braižoma kito aerodromo rato aukštingumo kreivė. Bandymo rezultatai pateikti 3.9 paveiksle.



3.9 pav. 14-os aerodromo ratų sugretinimas
Fig. 3.9. Juxtaposition of forthteen traffic circuit

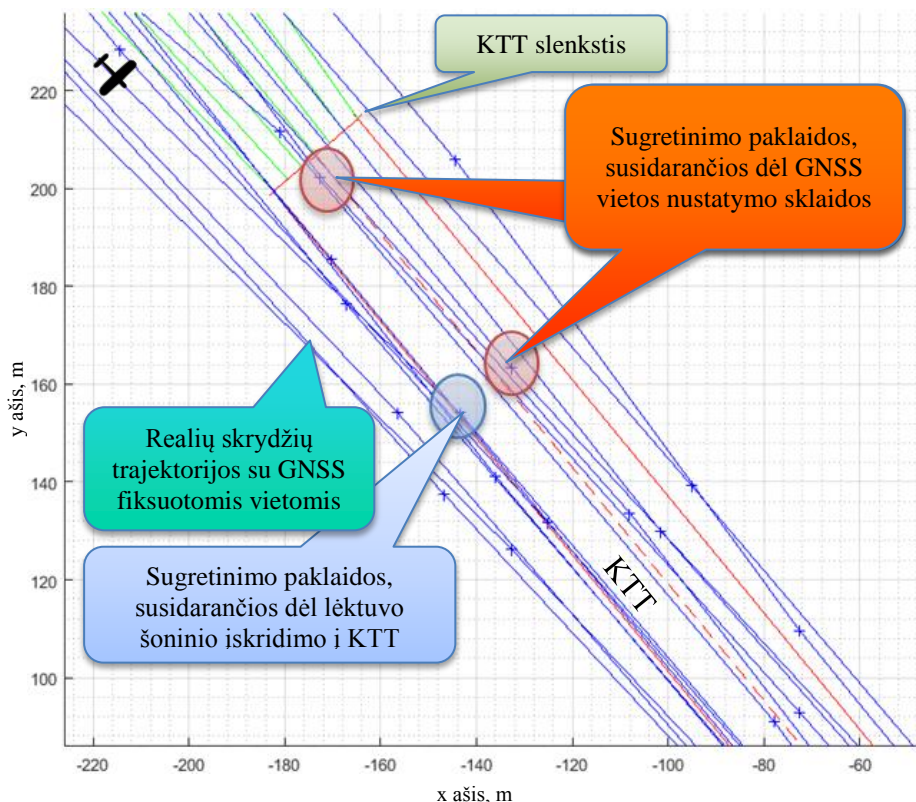
Kaip matyti 3.9 paveiksle, orlaivis porą kartų nepateko į triggerinę zoną ir kai kurios aukštingumo diagramos išsitiesė. Sugretintas skrydžio aukštingumo grafikas parodo, kad vieno aerodromo rato trukmė yra nuo 3 iki 5 min.

(~4 min.). Be to, yra keletas priežasčių, dėl kurių atsiranda aukštingumo diagramos sugretinimo paklaidos.

Pirma, kad sugretinimas įvyksta nebūtinai ties KTT slenksčiu (3.10 paveiksle pažymėta rausvais apskritimais). Tai priklauso nuo GPS imtuvo vietos atnaujinimo dažnio, kuris įvyksta ne tuo pačiu momentu, kai patenkama į KTT trigerinę zoną. Todėl, tuo geriau, kuo GPS imtuvas geba dažniau atnaujinti savo vietos duomenis.

Antra, orlaivis gali įskristi į KTT ne per slenkstį, o per KTT kraštą (3.10 pav. pažymėta mėlsvu apskritimu). Tokiu atveju, aerodromo ratų aukštingumo kreivių grąžinimas taip pat užvėlinamas.

Norint išvengti aerodromo ratų peršokimų ir matavimo paklaidų, siūloma sudaryti 3.11 paveiksle pateiktas dvi trigerines zonas, kurios neleis susidaryti aukštingumo diagramos peršokimams, jei orlaivis ne visiškai tiksliai skristų virš KTT.

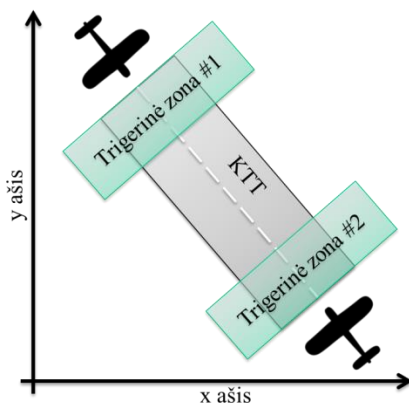


3.10 pav. Aerodromo rato kilimo tūpimo tako zona

Fig. 3.10. Runway zone of traffic circuit

Prieš pradėdant skrydį, programa patikrina, kuri iš šių dviejų triggerinių zonų bus pirmiau suaktyvinta, ir pagal tai galima automatiškai nustatyti, kuria kryptimi bus vykdomi aerodromo ratai. Pirmiau suaktyvinta triggerinė zona deaktyvuotą priešingos krypties triggerinę zoną, kad neįvyktų dvigubas aerodromo rato aukštingumo grąžinimas. Toliau aktyvioji triggerinė zona naudojama apskristų aerodromo ratų skaičiavimui, bei tuo pačiu naudojama matuojant skrydžio trukmę ir tai padėtų palyginti visus aerodromo ratus.

Iš 3.9 paveiksle gautų aukštingumo kreivių galima matyti, kaip pilotas išlaiko pastovų kilimą kiltinėje ir toltinėje. Beveik visų atliktų aerodromo ratų kilimo greitis suformuoja tam tikro pločio orlaivio kilimo tunelį, pagal kurį būtų galima vertinti piloto gebėjimą tinkamai aukštėti pagal nurodytas orlaivio charakteristikas. Tolimesnis grįžtinės ir kitų aerodromo rato dalių aukštingumas skirtingai pasiskirsto trukmės ašyje. Tikėtina dėl to, kad pilotas skrido ne visai pataikydamas į nurodytą aerodromo rato trajektoriją. Jei skristų, kiek įmanoma, tiksliau pagal nurodytą trajektoriją, būtų galima suformuoti aerodromo rato aukštingumo tunelį ir galinėje diagramos dalyje. Aukštingumo vertinimui galima sudaryti atitinkamą parabolės formos vertinimo tunelį.



3.11 pav. Aerodromo rato triggerinės zonos

Fig. 3.11. Trigger zones of traffic circuit

Aerodromo rato pradžios nustatymas taip pat gali būti įgyvendinamas pagal mažiausią skrydžio aukštį, randant aukštingumo kreivėje minimumus. Tam, kad nebūtų randamas viso skrydžio minimumas, reikalinga nurodyti aukštį, nuo kurio bus ieškomas kiekvieno aerodromo rato aukštingumo minimumas. 2.22 paveiksle nurodomas aukštis pažymėtas horizontalia linija ir tokiu būdu randamas kiekvienos parabolės žemiausias taškas. Prieš tai aprašytame aerodromo rato nustatymui pagal KTT slenkstį, lėktuvas dar būna neužbaigęs savo aerodromo rato (nebūna nutūpęs ant žemės). Šiuo atveju, taip būtų

fiksuojama orlaivio žemiausia vieta, kuri būtų KTT lygyje. Pirmuoju atveju skrydžio aukštis fiksuojamas pagal vietą, antruoju atveju – pagal aukštį.

3.3. Modelio tyrimas lėktuvo skrydžio laukimo zonoje

Eksperimentinio tyrimo tikslas – patikrinti laukimo zonų (standartinės laukimo zonos ir skrydžio aštuoniukės) tunelių tinkamumą vertinant realių lėktuvo pilotų skrydžio tikslumą.

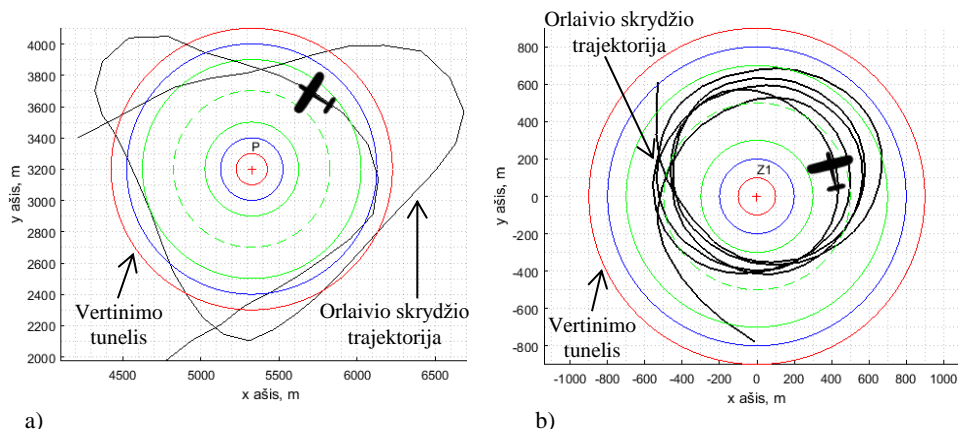
Eksperimento eiga ir analizė. Atliktas eksperimentinis orlaivio laukimo zonų skrydžio tikslumo vertinimas. 3.12 paveiksle pateiktas laukimo zonos modelis su vertinimo lygiais, sudarytas iš 7-ių apskritimų. Idealioji trajektorija (centrinė punktyrinė linija) turi 500 m spindulį, o vertinimo tuneliai yra 400, 600 ir 800 m pločio. 3.3 lentelėje pateikti eksperimento pradiniai duomenys. Šalia modelių pateikti ir palyginamieji eksperimentiniai skrydžiai. 3.12 paveiksle yra a) studento pirmasis savarankiškas skrydis, b) instruktoriaus skrydis.

3.3 lentelė. Skrydžio laukimo zonoje vertinimo tunelio eksperimento parametrai

Table 3.3. Experimental parameters of flight assessment tunnel in the holding zone

Parametrai	Reikšmės
Laukimo zonos tunelio parametrai:	
• nurodytosios trajektorijos spindulys (- - -), m	500
• vidiniojo tunelio plotis, m	400
• viduriniojo tunelio plotis, m	600
• išoriniojo tunelio plotis, m	800
Meteorologinės sąlygos:	
• vėjo kryptis, °	200
• vėjo greitis, m/s (kt)	3,6 (7)
Orlaivis	Cessna 172 (reg. nr. LY-LMH)
Matavimo įranga	Garmin GPSmap 78s

Pateiktą instruktoriaus skrydį galima laikyti kaip etaloną, kurį kiekvienas studentas turėtų pasiekti, norėdamas gauti aukščiausią įvertinimą. Vidinis tunelis padarytas platesnis, kad būtų didesnė tolerancija piloto skrydžio nuokrypams nuo nurodytos trajektorijos. Norint, kad vertinimo modelis tinkamai veiktų, būtina atlikti detalesnius tam tikro lėktuvo tyrimus, prie kokių jo posvyrio kampų ir greičių, kokio dydžio apskritimus lėktuvas išraižo. Tuomet, pagal pilotui nustatytus skrydžio parametrus, būtų galima tiksliai vertinti piloto skrydžio trajektorijos išlaikymo įgūdžius.



a)

b)

3.12 pav. Laukimo zonos modeliais ir eksperimentiniai skrydžiai:

a) studento skrydis; b) instruktoriaus (profesionalo) skrydis

Fig. 3.12. Models of holding zone and experimental flights:

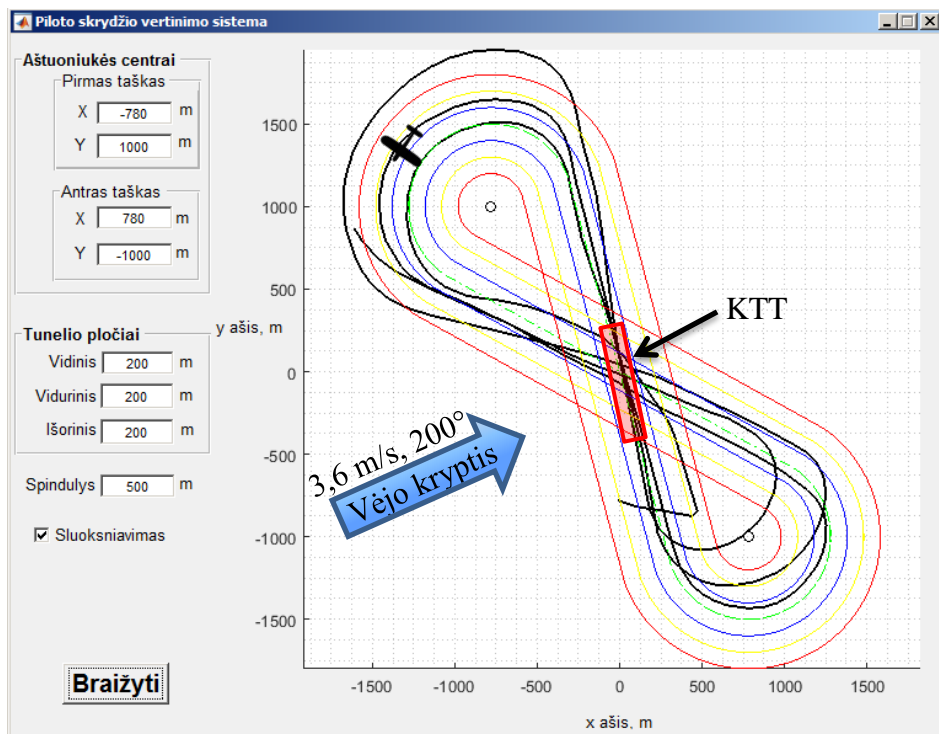
a) student flight; b) instructor (professional) flight

3.4 lentelė. Skrydžio aštuoniukėje vertinimo tunelio eksperimento parametrai**Table 3.4.** Experiment parameters of eight-form flight assessment tunnel

Parametrai	Reikšmės
Skrydžio aštuoniukės parametrai:	
• trajektorijos sankirtos koordinatės (KTT centro taškas, ENU 0, 0):	
o platuma, ° (WGS-84)	54,668115643974
o ilguma, ° (WGS-84)	25,515874049586
o KTT išilginė kryptis, °	130 / 310
• trajektorijos kilpų centrų koordinatės:	
o pirmojo taško (ENU):	
▪ x ašis, m	-780
▪ y ašis, m	1000
o antrojo taško (ENU)	
▪ x ašis, m	780
▪ y ašis, m	-1000
• aštuoniukės trajektorijos spindulys, m	500
• vertinimo tunelių pločiai:	
o vidiniojo, m	200 m
o viduriniojo, m	400 m
o išoriniojo, m	600 m
Meteorologinės sąlygos:	
• vėjo kryptis, °	200
• vėjo greitis, m/s (kt)	3,6 (7)
Orlaivis	Cessna 172 (reg. nr. LY-LMH)
Matavimo įranga	Garmin GPSmap 78s

2.3.6 poskyryje sudarytas aštuoniukės užduoties vertinimo modelis buvo eksperimentiškai išbandytas Kyviškių aerodrome su lėktuvu Cessna 172 (reg. nr. LY-LMH). 3.4 lentelėje pateikti eksperimento parametrai. Skrydis atliktas virš KTT (1-oje laukimo zonoje), kurį atliko patyręs instituto pilotas-instruktorius (profesionalas). Pilotas siekdamas kuo tiksliau atkartoti savo skrydžio aštuoniukės trajektorijas, posūkiuose laikėsi savo pasirinkto posvyrio kampo, o tiesiojoje dalyje skrido pagal laiką naudodamas chronometrą, esantį lėktuvo prietaisų skydelyje. Pilotas po posūkio ištiesinęs lėktuvą skrisdavo po 30 s iki sekančio posūkio. Tądien vyravo vidutiniškai 3,6 m/s (7 kt), 200° vėjas. Pilotas trajektorijos aukštingumą išlaikė 50 m ribose.

3.13 paveiksle matyti aštuoniukės vertinimo modelį, kurio idealiosios trajektorijos spindulys yra 500 m, vertinimo tunelių plotis – 200, 400 ir 600 m. aštuoniukės trajektorijų susikirtimo taškas atitinka KTT centrą. 3.13 paveiksle matyti, kad aštuoniukės modelio tiesiojoje dalyje pilotas geba tiksliau išlaikyti savo skrydžio trajektoriją, lyginant su posūkiuose atliktuose skrydžio trajektorijose. Taip pat matosi, kad aštuoniukės kilpos atliktos nevienodo dydžio.



3.13 pav. Aštuoniukės vertinimo modelio palyginimas su eksperimentiniu skrydžiu
Fig. 3.13. Comparison eight form assessment model with experimental flight

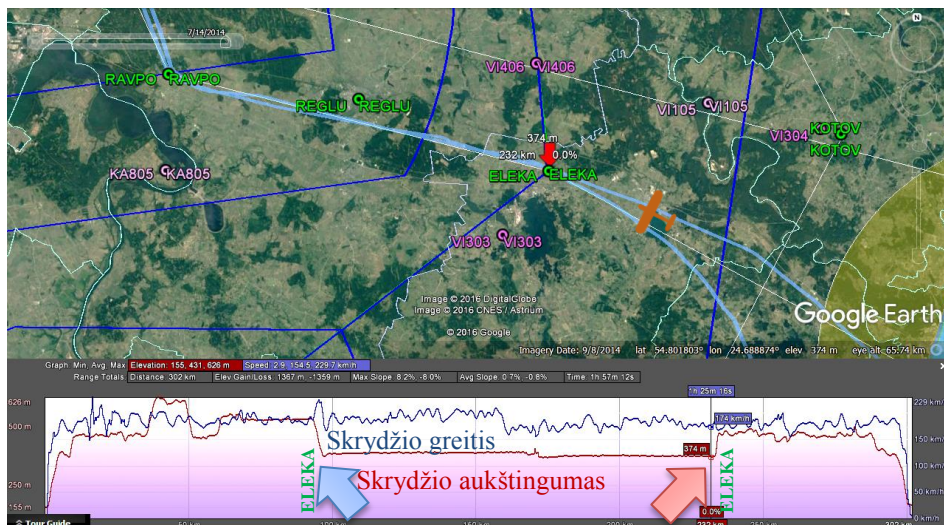
Todėl esamas skrydžio aštuoniukės modelis gali būti ateityje tobulinamas papildomai siaurinant tiesiąsias aštuoniukės skrydžio dalis suformuojant vertinimo tunelius, kurie būtų panašūs į kūgį. Kūgio siauriausioji dalis būtų ties trajektorijų susikirtimo tašku (šiuo atveju – KTT centro taškas), o plačiausioji dalis sutaptų su aštuoniukės tunelio lanko pločiu.

Šioje skrydžio aštuoniukės užduotyje, galima sakyti, kad pilotas turėjo ne du atraminius taškus, o tris, kadangi aštuoniukės skrydį pilotas atliko virš KTT esančioje laukimo zonoje. Todėl buvo aiškus aštuoniukės susikirtimo taškas – KTT vidurio taškas. Kaip matyti 3.13 paveiksle, pilotas vieną tiesiąją skrydžio aštuoniukės dalį skrido išilgai KTT, o kitą tiesiąją aštuoniukės dalį skrido kirsdamas KTT. Piloto skrydis išilgai KTT buvo tikslesnis, negu skrydis skersai KTT, nes turėjo aiškų vizualų antžeminį tašką.

Lyginant realius skrydžius, matyti, kad modelis leidžia lengviau vertinti, kuriose skrydžio trajektorijos vietose pilotas labiau nukrypo nuo nurodytos skrydžio trajektorijos bei kokie buvo jo skrydžio nuokrypiai.

3.4. Modelio tyrimas lėktuvo skrydyje maršrutu

Eksperimentinio tyrimo tikslas – patikrinti tunelio tinkamumą maršrutiniame skrydyje vertinant realią lėktuvo pilotų skrydžio tikslumą.

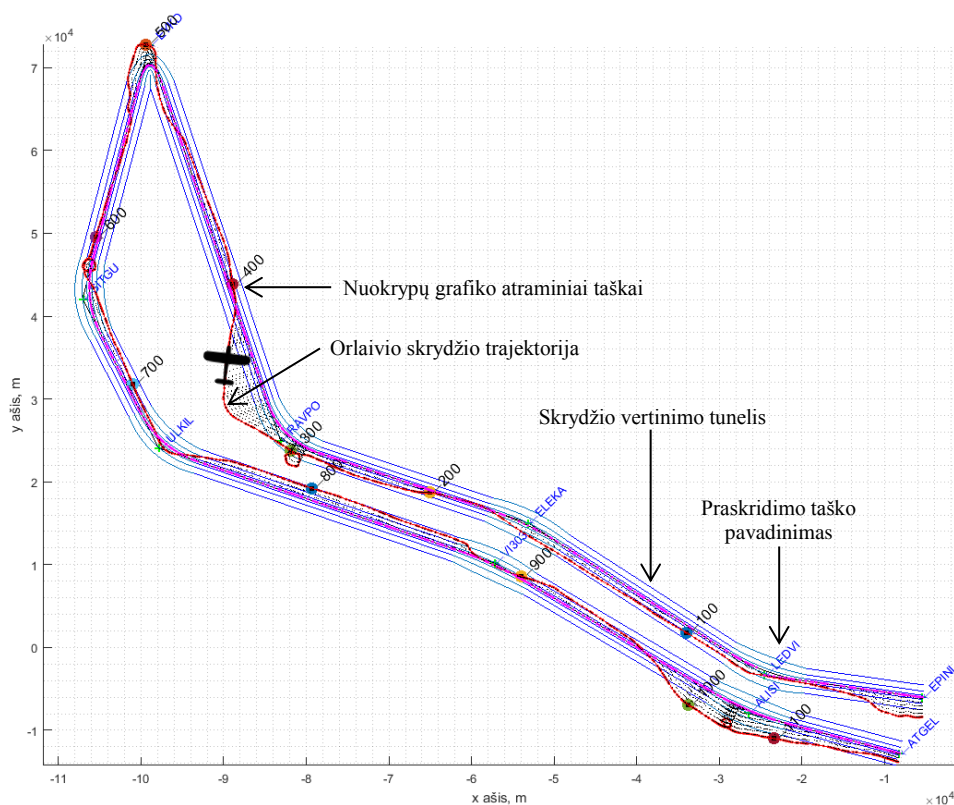


3.14 pav. Maršrutinio skrydžio analizė

Fig. 3.14. Analysis of en-route flight

Eksperimento eiga ir analizė. Maršrutinis skrydis – viena iš paskutinių užduočių, kuomet pilotas, naudojantis navigacijos žiniomis, tobulina savo

įgūdžius. Šios užduoties metu, pilotui svarbu išlaikyti skrydžio plane apsibrėžtos trajektorijos. Dažniausiai pilotai stengiasi prisilaikyti oro navigacijos žemėlapyje apsibrėžtų praskridimo taškų. Norint tinkamai vertinti piloto skrydžio trajektoriją, būtina remtis piloto pasirinktais arba instruktoriaus nurodytos trajektorijos praskridimo taškais.



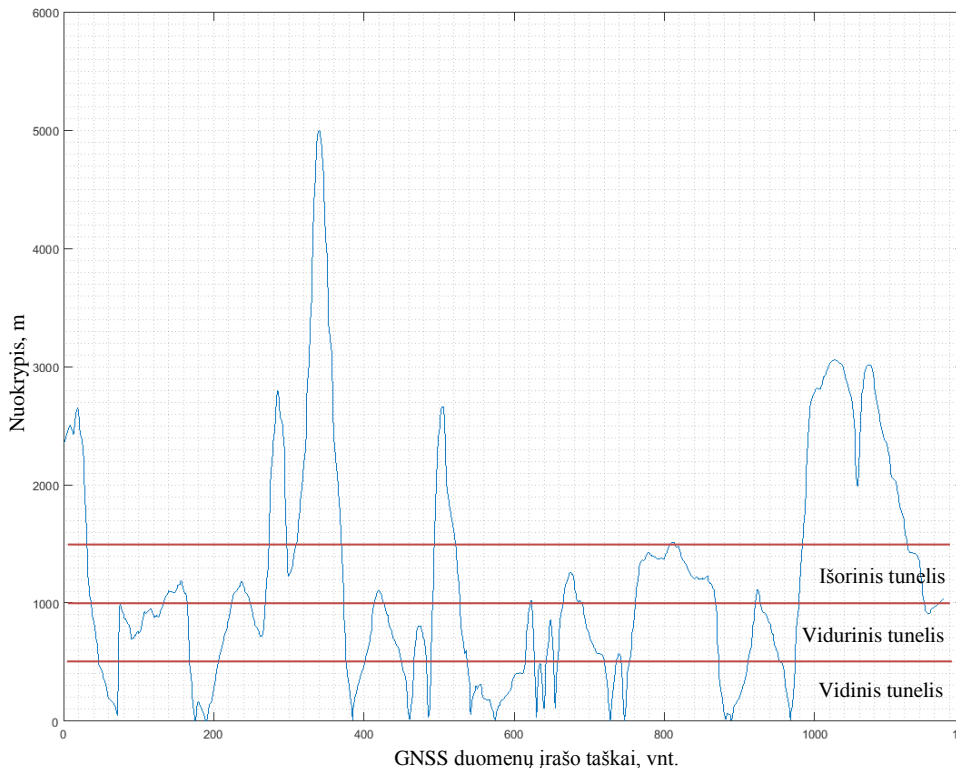
3.15 pav. Maršrutinio skrydžio trajektorijos tikslumo vertinimas

Fig. 3.15. Accuracy assessment of en-route flight trajectory

Naudojant šio darbo autoriaus sudarytu interaktyviu oro navigacijos žemėlapiu Google Earth programinėje įrangoje (3.14 pav.), matyti, pagal kokius atraminius taškus pilotas skrido ir kaip išlaikė trajektorijos tiesumą. Taip pat, galima pastebėti, kad pilotas priskridęs ELEKA tašką, keitė aukštį (nužemėjo), o grįždamas atgal, lygiai ties tuo pačiu tašku, vėl pakilo į nurodytą aukštį. Taigi atraminiai taškai jau padeda stebėti ir vertinti tam tikrus piloto skrydžio veiksmus. Taip pat 3.14 paveikslo skrydžio greičio diagramoje matyti, kad pilotas leisdamasis į žemesnį aukščio lygį, ties praskridimo tašku ELEKA, yra

matomas greičio šuolis, kadangi pilotas, besileisdamas, pamiršo valdyti orlaivio pastovų skrydžio greitį.

Pagal sudarytą oro navigacijos žemėlapi galima lengviau orientuotis, tačiau tikslesni vertinimai yra komplikuoti. Todėl šiems trūkumams kompensuoti, sukurtas automatizuotas skrydžio maršruto vertinimo tunelis, kuris leidžia tiksliai įvertinti piloto skrydžio nuokrypius nuo nurodytos maršrutinio skrydžio trajektorijos tiek vertikaliajoje, tiek horizontalioje plokštumoje.



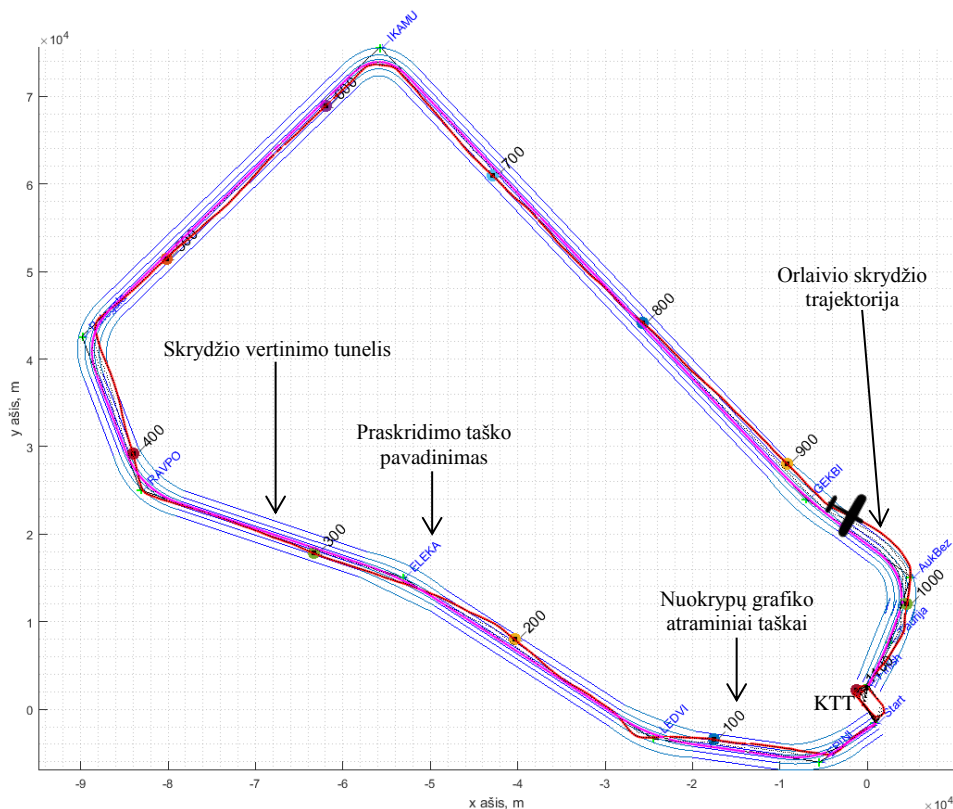
3.16 pav. Orlaivio horizontalūs nuokrypiai nuo nurodyto skrydžio maršruto iš 3.15 pav.

Fig. 3.16. Aircraft horizontal deviation from predefined en-route flight from 3.15 pav.

Vertinimo tunelio linkiai atitinka tikrąsias orlaivio skrydžio trajektorijas. Parinkus tinkamus posūkių DTA atstumus, orlaivio pilotas gali, nedarydamas staigių manevrų, nesunkiai skristi tunelio viduje. O pats tunelis gali būti sudaromas bet koku pasirinktu maršrutu pagal iš anksto nurodytus praskridimo taškus.

Skrydžio vertinimo tunelio parametrus galima keisti pagal instruktorių ir mokymo reikalavimus, tačiau eksperimentiniam skrydžių vertinimui (3.15 ir 3.17 pav.), parinkti atitinkami praskridimo taškai, bei nurodyti vienodi vertinimo

tunelių parametrai: posūkio linkio statumas (DTA) – 5000 m ir vertinimo tunelio lygių pločiai (vidiniojo – 500 m, viduriniojo – 1500 m ir išorinio – 3000 m). 3.15 ir 3.17 paveiksluose pavaizduoti maršrutinių skrydžių eksperimento pradiniai parametrai atitinkamai pateikti D priede D.15 ir D.16 lentelėse. Todėl visi pilotai, bet kuriuo pasirinktu skrydžio maršrutu, vertinami pagal vienodus vertinimo tunelio parametrus.



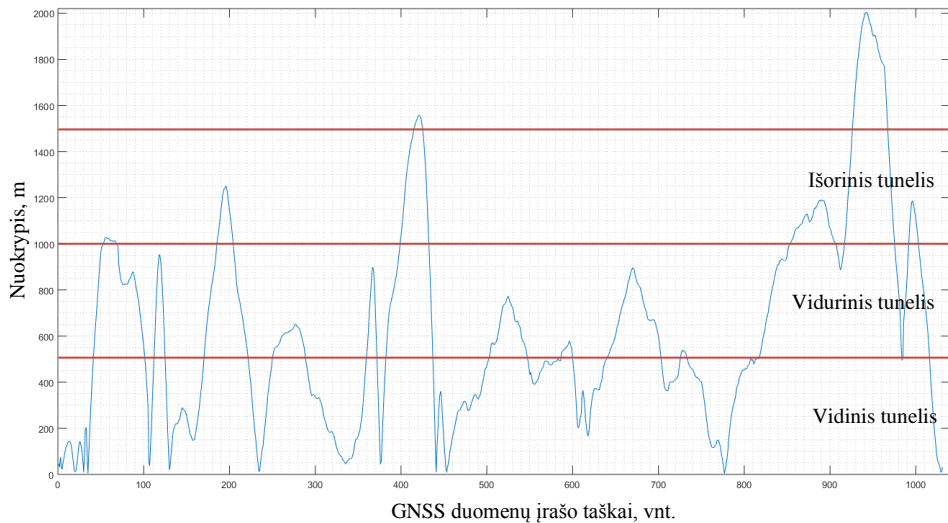
3.17 pav. Skrydžio maršrutu vertinimo modelis

Fig. 3.17. Assessment model of en-route flight

Kaip ir aerodromo rato, taip ir maršrutinio skrydžio vertinimo tunelyje panaudota skrydžio nuokrypių matavimo funkcija, kuri išmatuoja lėktuvo nuokrypius nuo nurodyto skrydžio maršruto ir grafiką vaizduoja atskirame lange. Tačiau nuokrypių grafike sudėtinga nustatyti, kur įvyko vienokie ar kitokie skrydžio nuokrypiai. Todėl 3.15 ir 3.17 paveiksluose pavaizduoti pasirinkto intervalo atraminiai lėktuvo skrydžio GNSS įrašo taškai (100, 200, 300, ...), kurie atitinka nuokrypių grafiko x ašies taškus (3.16 ir 3.18 pav.).

Todėl toks žymėjimas leidžia tiksliau įvertinti pasirinktas piloto skrydžio atkarpas.

3.16 ir 3.18 paveiksluose horizontalios linijos atitinka vienodai nustatytų skrydžio tunelio vertinimo lygių pločių parametrus. Nuokrypių grafikuose aiškiai matyti, kuriose vietose pilotai netenkino nurodyto skrydžio tikslumo ir jiems būtina kartoti skrydžius, tuo tikslu, kad tobulintų savo skrydžio tikslumo išlaikymo įgūdžius.



3.18 pav. Orlaivio horizontalūs nuokrypiai nuo nurodyto skrydžio maršruto iš 3.17 pav.

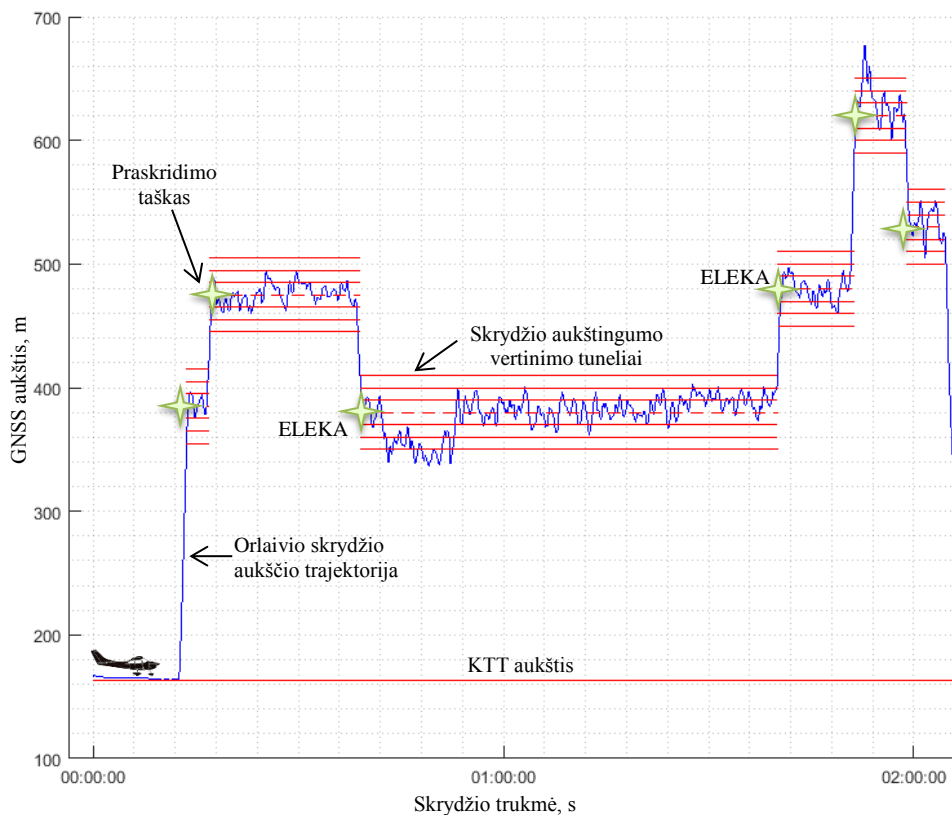
Fig. 3.18. Aircraft horizontal deviation from predefined en-route flight from 3.17 pav.

Maršrutinio skrydžio tunelio posūkiuose taikomas skrydis šalia praskridimo taško (angl. *Fly-by*). Šiuo būdu pilotas niekada neturi skristi virš praskridimo taško posūkyje, o privalo tolygiai keisti kryptį nuo pirminio kurso į tolimesnį numatytą kursą, kai tik priartėja prie praskridimo taško nurodytu DTA atstumu. Toks metodas dažniausiai taikomas maršrutiniuose skrydžiuose.

Vertinant skrydžius, svarbu žinoti vertinimo patikimumą. Jeigu išorinio tunelio riba yra 3000 m pločio, o imant, kad GNSS imtuvo vidutinė padėties nuokrypis yra 10 m, tai tikimybė, kad lėktuvas išskris iš tunelio ribos dėl GNSS imtuvo paklaidų yra 0,33 %. Taigi, lyginant su ICAO RNP reikalavimais, kuriuose reikalaujamas tikslumas yra 95 % bendro skrydžio laiko, tai pagal mūsų turimą įrangą ir esant 3000 m pločio tuneliui, galima užtikrinti 99,67 % skrydžio vertinimo tikslumą. Pagal Lietuvoje galiojančius aukštuminių prietaisinių skrydžių zoninės navigacijos (RNAV) tikslumo reikalavimus, būtina užtikrinti ± 5 NM (± 9260 m) skrydžio tikslumą, o pagal CAA pilotui mėgėjui taikomus reikalavimus, turi išlaikyti ± 2 km skrydžio tikslumą (A priedas).

Palyginus maršrutinio skrydžio vertinimo tunelį su orlaivio skrydžiu, matyti, kad tunelis leidžia tiksliai įvertinti piloto skrydžio nuokrypius. Aiškiai matomi neleidžiamai viršyti skrydžio nuokrypiai. Viršijus neleistinus nuokrypius, piloto skrydžio nuokrypiai toliau tiksliai vaizduojami atskirame nuokrypių grafike.

Maršrutiniame skrydyje taip pat svarbu stebėti skrydžio aukštį. Kaip matyti iš 3.19 paveikslo, tarp skirtingų praskridimo taškų gali būti nurodomas nevienodas skrydžio aukštis, todėl atliekant automatinę skirtingų lygių aukštingumo vertinimą, būtina automatizuotai perjunginėti aukščio lygius.



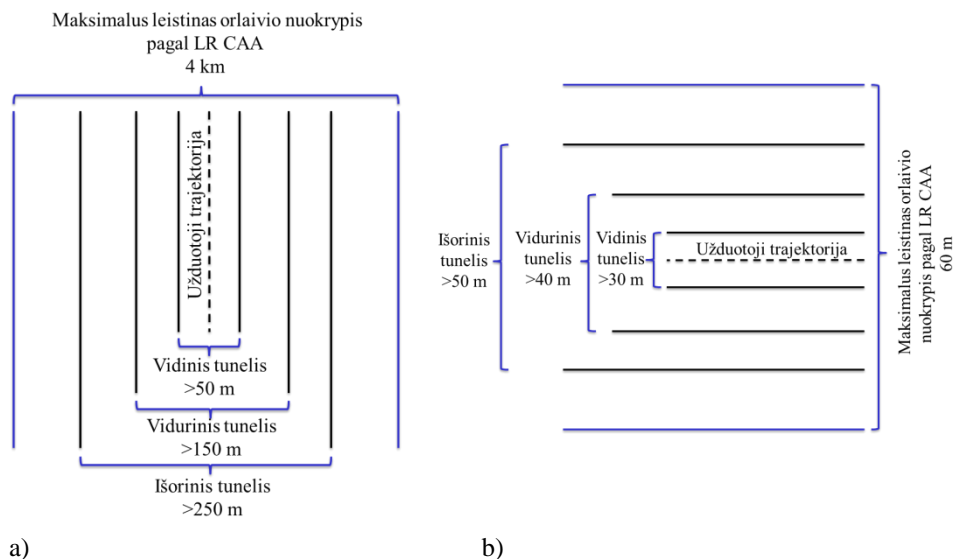
3.19 pav. Tuneliais grindžiamo lėktuvo maršrutinio skrydžio aukštingumo vertinimas iš 3.15 pav. skrydžio

Fig. 3.19. Tunnel based airplane en-route flight altitude assessment from fig. 3.15 flight

Kaip jau buvo aprašyta aerodromo rate, taip ir šiuo atveju, reikiamos padėties fiksavimui, galima taikyti Matlab inpolygon funkciją. Aplink praskridimo taškus sudarius atitinkamo dydžio zonas, kai lėktuvas įskrenda į jas,

atsiranda galimybė reikiamu momentu automatizuotai perjunginėti aukštingumo vertinimo parametrus. Taip pat, tuo metu orlaivio skrydis turėtų būti nevertinamas, kol neužims naujo nurodyto aukščio. Kiekvienas praskridimo taškas turi būti apibrėžtas tam tikro dydžio zona, kurioje lėktuvas spėtų pasiekti reikiamą aukštį. 3.19 paveiksle išmatavus lėktuvo aukščio keitimo atstumus, gauti 2,6; 2,7; ir 3,6 km atstumai. Tikslinga paimti didesnę zonos skersmens atstumą, kad neįvyktų klaidingas vertinimas, jeigu nespėtų laiku užimti leistino aukščio. Taigi zonos skersmuo su atsarga turėtų būti 4 km. Jei pilotas nespėja laiku užimti reikiamo aukščio, taip pat į tai turėtų būti atsižvelgiama.

Vertinant piloto skrydžio aukštingumo išlaikymą, 3.19 paveiksle matyti, kad didžiąją dalį skrydžio pilotas geba lėktuvo skrydį išlaikyti 50 m tikslumu vertikaliajame tunelyje. Pagal CAA reikalavimus pilotui mėgėjui, leidžiama nukrypti ± 30 m (A priedas).



3.20 pav. Rekomenduojami minimalūs tunelių pločiai:

a) horizontalūs tuneliai; b) vertikalūs tuneliai

Fig. 3.20. Recommended minimal tunnel widths:

a) horizontal tunnels; b) vertical tunnels

Apibendrinus matavimo įrangos paklaidas bei LR CAA skrydžio tikslumo reikalavimus, kai matavimo įrangos horizontalios vietos nustatymo paklaidos yra ± 5 m, o vertikalios ± 3 m, ir imant 10-ies kartų atsargą vidinio tunelio matmenims, rekomenduojamas minimalus horizontalaus vidinio tunelio plotis – 50 m, viduriniojo – 150 m ir išorinio – 250 m (3.20 pav., a), o vertikalaus

vidiniojo tunelio plotis – 30 m, viduriniojo – 40 m ir išorinio – 50 m (3.20 pav., b).

Ištirus skirtingų pilotų orlaivio skrydžio aukštingumo grafikus (pateikti D priede) ir grafikuose parinktos skrydžio dalis, kuriose pilotai siekė išlaikyti skrydžio aukštį, nustatyta, kad skrydžio aukščio standartinis nuokrypis svyravo nuo 3,7989 m iki 28,0605 m. Iš 20-ies skaičiuotų skrydžio aukštingumo trajektorijų dalių, apskaičiuotas standartinių nuokrypių vidutinė kvadratinė paklaida, kuri lygi 15,6453 m (vidurkis lygus 13,73 m.). D priede pateikta rezultatų suvestinė D.21 lentelėje.

Maršrutinio skrydžio tunelio modelis sudaro ištis dideles galimybes tolimesniam jo plėtojimui, papildomai įterpiant įvairius funkcionalumus, kurie dar labiau padėtų instruktoriui tinkamai įvertinti orlaivių skrydžio tikslumą detalizuojant įvairius galimus skrydžio parametrus. Tai galėtų būti vertinimo tunelio ir skrydžio atstumų palyginimas. Tai leistų atitinkamai vertinti, kiek dėl netikslaus skrydžio padidėjo orlaivio degalų sąnaudos. Papildomai gali būti stebimas orlaivio greičio išlaikymas, aukštėjimo ir žemėjimo greičiai bei matuojama tunelio ribų pažeidimo trukmė.

Sukurtas skrydžio vertinimo tunelis turi išskirtinai plačias taikymo sritis: tiek pilotų rengimui skirtuose praktiniuose mokymuose, tiek įvairių orlaivių tikslaus skraidymo varžybose (lėktuvų, sraigtasparnių, parasparnių bei bepiločių orlaivių varžybose). Taip pat sukurtas pagrindas tolimesniam šios vertinimo sistemos tyrimui plėtojimui bei pilotų vertinimo kriterijų nustatymui.

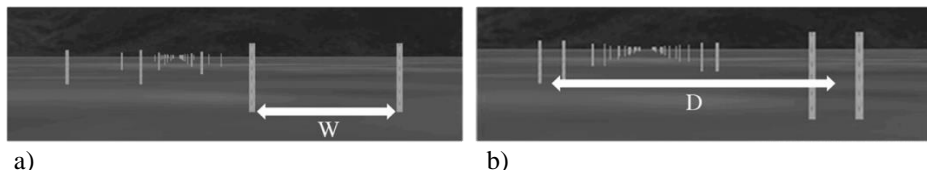
3.5. Modelio tyrimas sraigtasparnio skrydyje slalomo trajektorija

Eksperimentinio tyrimo tikslas – nustatyti sraigtasparnio pilotų skrydžio strategiją trijose slalomo užduoties sudėtingumo lygiuose ir patikrinti sudarytą slalomo užduoties tunelį vertinant pilotų skrydžio tikslumą visame slalomo užduoties skrydyje, kuris bus skirtas naudoti pilotų rengimo ir vertinimo eigoje.

Eksperimento eiga ir analizė. Stažuotės metu, kartu su paskirtuoju tyrimo vadovu Prancūzijoje dr. Bruno Berberian, Fitso dėsnio paremtas tyrimas atliktas su 4-iais brazilų sraigtasparnio pilotais Prancūzijos ONERA (pranc. *Office National d'Études et de Recherches Aéropatiales*) aeronautikos tyrimų laboratorijoje naudojant tyrimams pritaikytą skrydžio treniruoklį, kuriame veikia AIRBUS HELICOPTER LC225 sraigtasparnio kinematinis ir aerodinaminis modelis.

Remiantis sraigtasparnio pilotų slalomo užduoties (3.22 pav.) mokymo reikalavimais (AMCOM 2000), skrydžio treniruoklyje tyrimui parinkta vieta virš ežero Etang Du Berre, kad būtų lygus pagrindas ir piloto neblaškytų pašaliniai objektai. Pilotai turėjo praskristi pro ežerą išdėstytus stulpus, kurių

aukštis yra 150 ft (45,72 m). Pilotas turėjo išlaikyti sraigtasparnio aukštį ribose tarp 50 ft (15,24 m) ir 100 ft (30,48 m). Eksperimento parametrai pateikti 3.6 lentelėje.

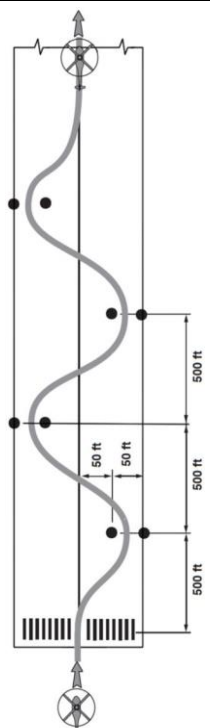


3.22 pav. Slalomo užduoties vaizdas iš sraigtasparnio (Loeches 2013)

Fig. 3.22. View inside helicopter of slalom task (Loeches 2013)

3.6 lentelė. Sraigtasparnio slalomo užduoties eksperimento parametrai

Table 3.6. Experiment parameters of helicopter slalom task

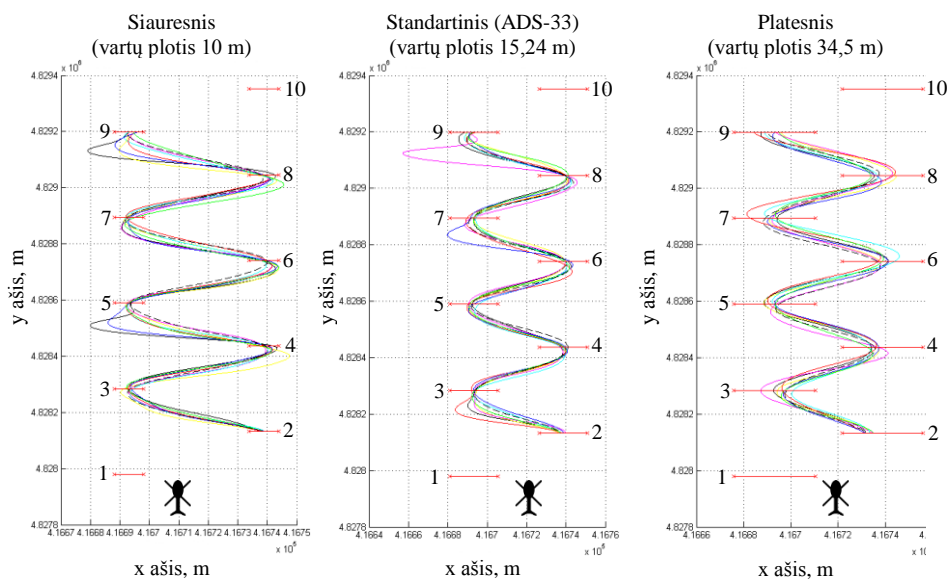
Parametrai	Reikšmės	 <p>Slalomo skrydžio schema (AMCOM 2000)</p>
Išilginis atstumas tarp vartų	152,4 m (500 ft)	
Skersinis atstumas tarp vartų	45,72 m (150 ft)	
Vartų pločiai:		
• siauresnis	10,00 m (32,81 ft)	
• standartinis (ADS-33)	15,24 m (50 ft)	
• platesnis	34,50 m (113,19 ft)	
Vartų stulpų aukštis	45,72 m (150 ft)	
Sraigtasparnio pradinis greitis	28 km/h (15 kt)	
Sraigtasparnio aukščio išlaikymo ribos	15,24–30,48 m (50–100 ft)	
Eksperimento įranga	mokslinis skrydžio imitatorius su sraigtasparnio Airbus EC225 kinematinio ir aerodinaminio modeliu	
Eksperimento dalyviai	keturi brazilų tautybės sraigtasparnio pilotai	
Eksperimento eiga:		
1 pilotas	24 eksperimentiniai skrydžiai	
2 pilotas	24 eksperimentiniai skrydžiai	
3 pilotas	24 eksperimentiniai skrydžiai	
4 pilotas	24 eksperimentiniai skrydžiai	
	VISO: 96 skrydžiai	

Remiantis ADS-33 reikalavimais, sudaryta slalomo užduotis su trimis sudėtingumo lygiais, kuriuose kinta stulpais pažymėtų vartų plotis W (3.22 pav.). Standartinės užduoties vartų plotis visiškai atitinka ADS-33 reikalavimus, kurio plotis yra 50 ft (15,24 m) (3.23 pav.). Taip pat, kad būtų galima palyginti skrydžius, sudaryta viena sunkesnė ir viena lengvesnė slalomo užduotis, kurių vartų pločiai atitinkamai parinkti 10 ir 34,5 m. Panašų slalomo užduoties tyrimą (3.22 pav.) atliko Loeches (2013), kuriame jis tyrė sraigtašparnio pilotų rankos judesius, kuria jie valdė vairalazdę, taikant Fitso dėsnį.

Vykdant mūsų tyrimą, pilotai atliko bandomuosius skrydžius, kad prisitaikytų prie nurodytos užduoties ir jos parametrų. Eksperimentas pradedamas su pradiniu 15 kt (28 km/h) greičiu, kuris nurodytas ADS-33 dokumento reikalavimuose (AMCOM 2000). Be abejo, skrydžio metu, pilotas galėjo keisti nustatytą greitį pagal jam labiau priimtina greitį, pagal kurį galėtų atlikti užduotį.

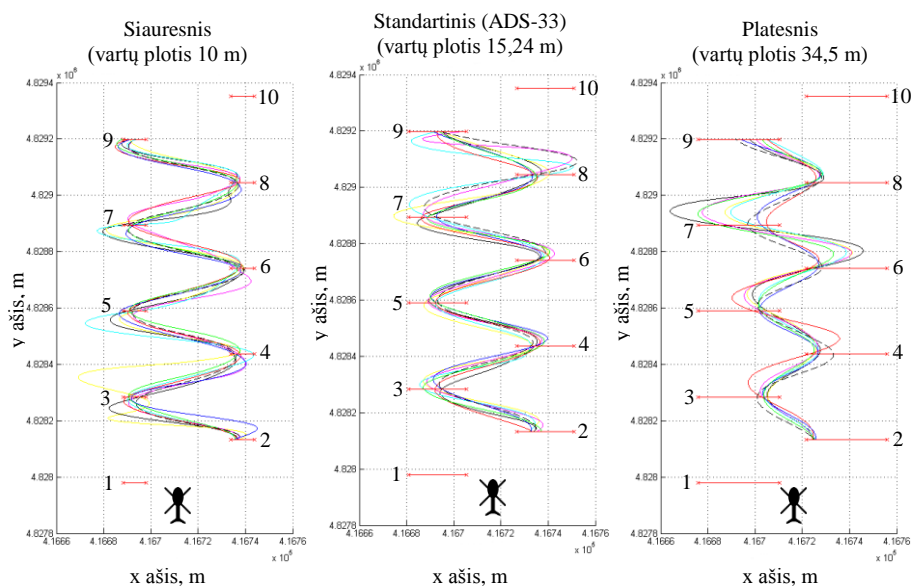
Tolimesniame etape, duomenų apdorojimui, naudotas Matlab programinis paketas, kuriuo pavaizduojami pilotų skrydžiai ir sužymimi išdėstyti stulpai, imituojantys vartus, kad matytųsi, kaip pilotai atliko užduotį skrisdami pro juos. 3.23–3.26 paveiksluose. pavaizduotos atitinkamai 4-ių pilotų skrydžio trajektorijos, kurias jie skrido po 8-is kartus kiekviename sudarytame sudėtingumo lygyje. Kiekvieno piloto skrydžio trajektorijos suskirstytos pagal tris sudėtingumo lygius: sunkesnis, vidutinis (standartinis ADS-33), lengvesnis. Iš viso, pilotai turėjo praskirsti pro dešimt vartų, tačiau panaikinti rezultatai tarp 1 ir 2, bei 9 ir 10 vartų (horizontalios raudonos linijos), kadangi šie skrydžio rezultatai gali būti netikslūs, nes vertinant tai, kad reikalingas laikas, kol pilotas sustabilizuoja sraigtašparnį slalomo užduoties skrydžio režimui.

Atlikus eksperimentus, pastebėta, kad pakitus vartų pločiui, keičiasi ir pilotų skrydžio strategija. Kai yra lengviausias lygis, kai vartų plotis yra 34,5 m, tai, paprastai, pilotas praskrenda vartus ir tik tuomet keičia skrydžio kursą link kitų slalomo vartų, t. y., skrydžio sinusoidės amplitudės maksimumas pasiekiamas tik praskridus slalomo vartus. Tačiau esant sudėtingesnei užduočiai (susiaurėjus vartų pločiui), pilotas stengiasi anksčiau keisti skrydžio kursą, kad turėtų daugiau laiko ir didesnę atstumą ištiesinti sraigtašparnį link sekančių slalomo vartų. Taigi, iš sudėtingiausio lygio, kai vartų plotis yra 10 m, matyti, kad skrydžio sinusoidės amplitudės maksimumas pasiekiamas dar prieš pat praskrendant slalomo vartus.



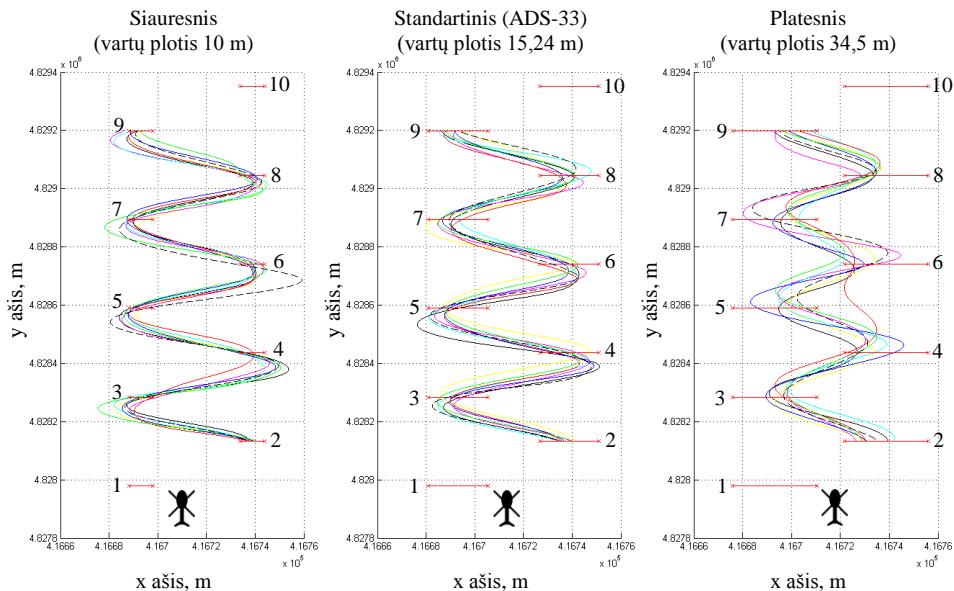
3.23 pav. 1 piloto slalomo užduoties eksperimentas

Fig. 3.23. Slalom task experiment of pilot 1



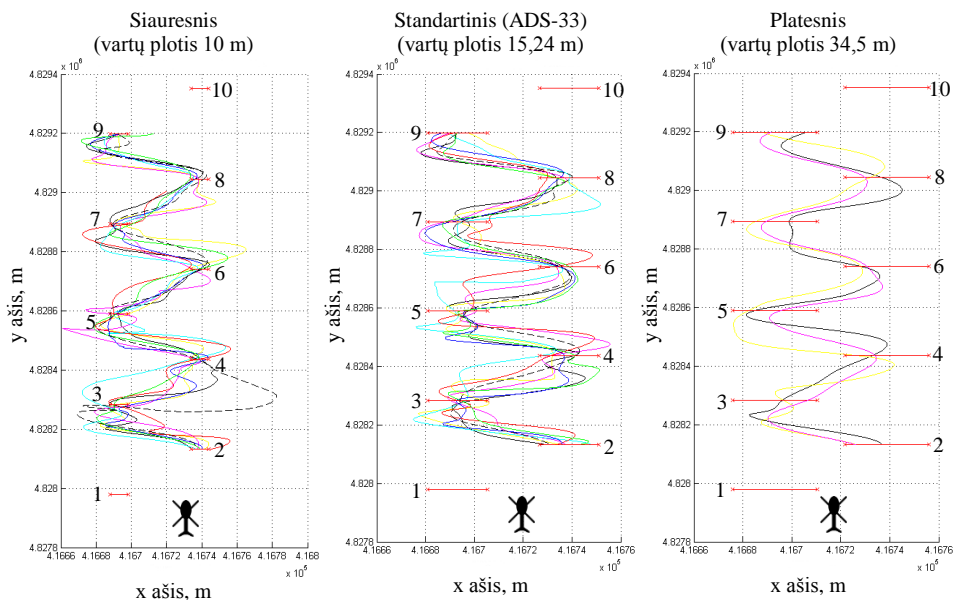
3.24 pav. 2 piloto slalomo užduoties eksperimentas

Fig. 3.24. Slalom task experiment of pilot 2



3.25 pav. 3 piloto slalomo užduoties eksperimentas

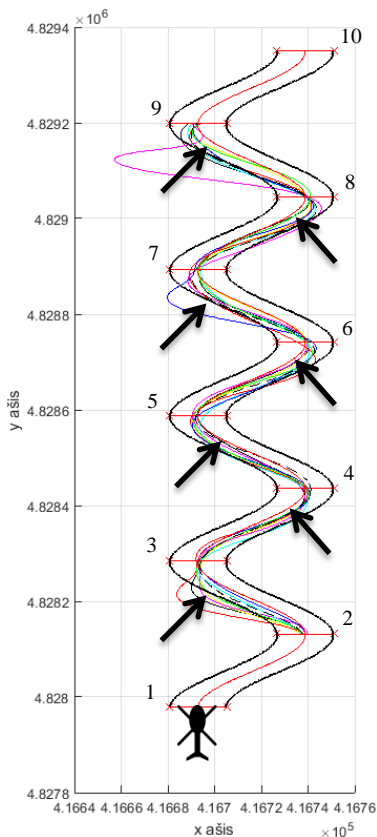
Fig. 3.25. Slalom task experiment of pilot 3



3.26 pav. 4 piloto slalomo užduoties eksperimentas

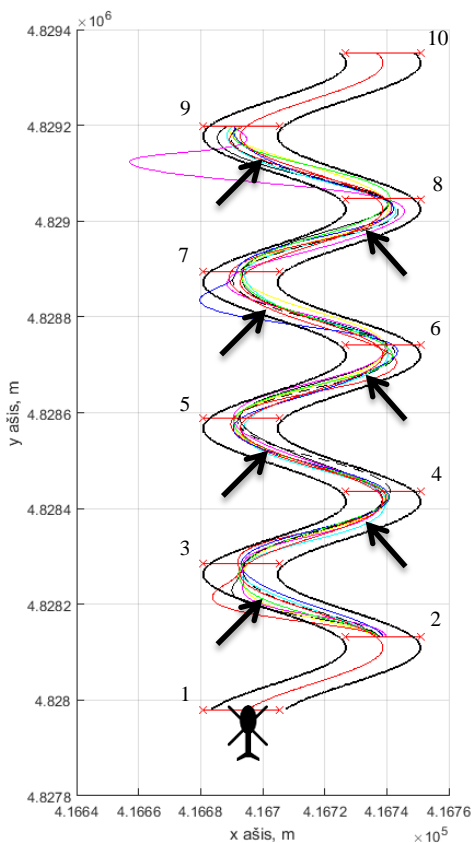
Fig. 3.26. Slalom task experiment of pilot 4

Lyginant atliktus pilotų skrydžius, pirmasis pilotas trajektoriją išlaikė tiksliausiai (3.23 pav.). Iš 2-ojo ir 3-ojo piloto skrydžio (3.24 ir 3.25 pav.) matyti, kad esant lengvesnei užduočiai, pilotai linkę labiau skubėti ir dėl to jų skrydžio tikslumas gerokai sumažėjęs lyginant su sunkiausia užduotimi. Galiausiai, jų skrydžio trajektorijos buvo linkusios rezonuoti iki tiek, kad sraigtasparnio valdymas tapdavo agresyvus, bandant pataikyti į vartus. 4-ajam pilotui skrydžio slalomo užduotis buvo itin sudėtinga (ypač siauresnio ir standartinio pločio vartuose). 3.26 paveiksle matomi visiškai nestabilių skrydžio rezultatai.



3.27 pav. Vertinimo tunelis sugretintas su slalomo užduoties vartais

Fig. 3.27. Assessment tunnel juxtaposed with gates of slalom task



3.28 pav. Vertinimo tunelis paslinktas pagal 1 piloto slalomo skrydžio trajektorijas

Fig. 3.28. Assessment tunnel shifted according to Pilot 1 slalom flight trajectories

Sugretinus 2-ajame skyriuje sudarytą slalomo skrydžio vertinimo tunelio amplitudės maksimumus su realių skrydžių praskridimo vartais, kaip ir buvo

minėta, standartinėje slalomo užduotyje pilotas praskrisdamas pro vartus iš anksto nusitaiko skrydžiui pro vartus, todėl 3.27 paveiksle matyti (vietos pažymėtos rodyklėmis), kad nuolatos išskrenda iš išorinės tunelio dalies. Kad vertinimo modelis atitiktų sraigtasparnio piloto skrydžio valdymo strategiją, reikia šiek tiek vertinimo tunelį paslinkti atgal (3.28 pav.).

Tokiu atveju, tunelio amplitudės maksimumas nebūtų sutapdintas su slalomo vartais. Paslinktasis slalomo tunelis geriausiai atitinka piloto skrydžio strategiją standartinėje ir sudėtingesnėje užduotyje, kai slalomo tunelio amplitudės maksimumas yra paslinktas 20 m atgal nuo praskridimo vartų. O esant platesniems slalomo vartams už standartinę užduotį, kai vartų plotis yra 34,5 m, geriau piloto skrydžio strategiją atitinka, kai slalomo skrydžio tunelis yra paslinktas 20 m į priekį nuo praskridimo vartų.

Iš pateiktų rezultatų matyti, kad sudarytas slalomo skrydžio vertinimo tunelis padeda lengviau vertinti piloto skrydžio trajektorijos tikslumą. Labiau nukrypusios skrydžio trajektorijos iš karto patenka už vertinimo tunelio ribų. Piloto skrydis vertinamas ne tik ties slalomo užduoties vartais, bet ir visoje skrydžio trajektorijoje.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

1. Atlikus bandomuosius skrydžius nustatyta, kad metodika tinka vertinti orlaivio piloto skrydžio tikslumą visose skrydžio fazėse: aerodromo rate, laukimo zonoje, maršrute bei atliekant sraigtasparnio pilotavimo specifikai būdingus mokomuosius skrydžius.
2. Ištyrus aerodromo rato modelyje naudojamą Matlab inpolygon funkciją pastebėta, kad atsiranda nevienodos padėties laiko fiksavimo sugretinimo paklaidos:
 - a) nustatyta, kad paklaidos sumažėtų, jei būtų naudojamas didesnis GNSS imtuvo vietos nustatymo dažnis;
 - b) nustatyta, kad orlaiviui į KTT zoną įskridus tam tikru kampu nuo KTT ašinės linijos, paklaidos padidėja. Šiai problemai spręsti, triggerinės zonos turi būti išplėstos ties KTT slenksčiais, kad ne tik sumažėtų sugretinimo paklaidos, bet ir būtų išvengta nepageidaujamų skrydžio peršokimų atsiradimo;
 - c) nustatyta, kad suveikus triggerinei zonai, orlaivis dar būna nepalietęs žemės. Norint nustatyti mažiausią orlaivio aukštį ir sugretinti kiekvieno aerodromo rato aukštingumus, taikoma minimumo funkcija.
3. Ištyrus aerodromo rato tunelio modelį nustatyta, kad aukštingumo gretinimui naudojamas nurodytas atraminis aukštis leidžia sugretinti

aukštingumus ne nuo KTT slenksčio, o vietose, kur nustatomas mažiausias orlaivio skrydžio aukštis.

4. Aerodromo rato vertinimo modelio trajektorijos paklaidos matuojamos pagal skersinius skrydžio kelio nuokrypius. Nustatyta, kad naudojama Matlab funkcija ieško artimiausio taško iki idealiosios aerodromo rato trajektorijos ir dėl to atsiranda dvi matavimo problemos, kai orlaivis labai nutolsta nuo nurodytosios trajektorijos:
 - a) vidinėse posūkių pusėse, kadangi lanko įlinkio atstumas tampa tolesnis, negu tiesiosios aerodromo rato linijos;
 - b) kai orlaiviui per toli nukrypus nuo nurodytos trajektorijos ir priartėjus prie priešingos krypties skrydžio trajektorijos.
5. Norint aerodromo rato posūkiuose išvengti skrydžio nuokrypių matavimo netikslumų, tikslingiausia apriboti leidžiamus skrydžio nuokrypius nuo nurodytos trajektorijos bei taikyti aerodromo rato segmentavimą.
6. Gauti lėktuvo skrydžio aštuoniukės skrydžio rezultatai pagrindžia hipotezę, kad pilotas geba išlaikyti mažesnius skrydžio nuokrypius tiesiojoje trajektorijos dalyje, negu posūkiuose. Tam būtų tikslinga tiesiąją trajektorijos dalį siaurinti ties aštuoniukės centru suformuojant kūgio formos trajektoriją. Kadangi pilotas vieną trajektorijos tiesiąją skrido išilgai KTT, todėl šią trajektorijos dalį pilotas gebėjo suskrista tiksliau, negu kryžmiškai susikertančioje tiesiojoje trajektorijoje.
7. Analizuojant sraigtasparnio slalomo užduoties skrydžius nustatyta, kad, panaudojus sumodeliuotą vertinimo tunelį, piloto skrydį galima tiksliai įvertinti visoje slalomo užduoties trajektorijoje.
8. Ištyrus sukauptus skirtingų pilotų maršrutinių skrydžių duomenų aukščius apskaičiuota, kad laisvajame skrydyje, aukščio išlaikymo metu, standartinis nuokrypis svyruoja nuo 3,8 iki 28,1 m., todėl remiantis šiais rezultatais galima sudaryti atitinkamo pločio tunelius ir pagal LR CAA pilotų skrydžio tikslumo normas atitinka reikalavimus.
9. Ištyrus slalomo skrydžio užduotis, kurių vartų pločiai yra skirtingi, nustatyta, kad dėl pilotų taikomos skrydžio strategijos, kai slalomo vartai didėja nuo standartinės slalomo užduoties, slalomo tunelio amplitudės maksimumą reikalinga proporcingai paslinkti į priekį. Ir atvirkščiai, kai slalomo vartų plotis mažėja, slalomo tunelio amplitudės maksimumus reikalinga proporcingai paslinkti atgal.

Bendrosios išvados

1. Analitinės mokslinės literatūros, susijusios su skrydžio vykdymu bei metodais skrydžiams vertinti apžvalga atskleidė, kad nėra sukurtos visus skrydžio etapus apimančios piloto skrydžio vertinimo sistemos. Įvertinus vystomas išmaniąsias automatizuotas sistemas nustatyta, kad vertinimo sistemos yra fragmentiškos, orientuotos tik į konkrečią užduotį ir negalinčios atlikti tinkamos skrydžio analizės ir patikimo piloto vertinimo visuose skrydžio etapuose.
2. Nustatyta, kad, intensyvėjant oro skrydžiams ir griežtėjant oro erdvės naudojimo reikalavimams, būtinas atitinkamas pilotų parengimas ir jų vertinimas, kuris užtikrintų atitikimą šiems reikalavimams ir reikalingą skrydžio saugą. Įrodyta, kad skrydžio tunelių modeliavimu pagrįsta vertinimo metodika yra tinkama įvertinti piloto skrydžio nuokrypius nuo nurodytos trajektorijos.
3. Taikant šiuolaikines Matlab matematinio modeliavimo priemones sukurta skrydžio tikslumo vertinimo metodika bei sumodeliuoti visus skrydžio etapus apimantys skrydžio vertinimo modeliai, kuriuose pritaikyti automatizuoti jų sudarymo metodai, t. y. aerodromo rato, laukimo zonos, maršrutinio skrydžio ir sraigtašparnio slalomo vertinimo modeliai.

4. Nustatyta, kad vertinimo metodikai sudaryti reikalingi šie esminiai sprendimai: automatizuotų tunelių sudarymas pagal iš anksto nurodytus skrydžio tunelio parametrus, orlaivio skrydžio trajektorijos koordinačių transformacija, skrydžio tunelio koordinačių pasukimas, posūkio krypties nustatymas, bei kampų ir kursų skaičiavimai tarp praskridimo taškų.
5. Pritaikius tunelių formavimo matematinius modelius orlaivių pilotavimo tikslumui vertinti realiuose skrydžiuose, nustatyti esminiai metodikos taikymo ypatumai ir įsitikinta, kad darbe sukurtos priemonės tinka automatizuotam visų skrydžio etapų vertinimui. Skrydžio vertinimo tuneliai pritaikomi ne tik mokomuosiuose, bet ir įvairių orlaivių tikslaus skraidymo varžybose.
6. Disertacijoje pasiūlyti piloto skrydžio vertinimo modeliai tinkami tiksliai (su <10 m paklaida) išmatuoti piloto skrydžio nuokrypius nuo nurodytos skrydžio trajektorijos. Pasiūlyta nauja skrydžio tikslumo vertinimo metodika, kurioje taikoma keliais tunelių lygiais pagrįsta vertinimo priemonė. Šioje disertacijoje siūlomas lanksčiai pritaikomus vertinimo modelius galima taikyti sudarant įvairių tipų trajektorijoms bei įvairios klasifikacijos sraigtasparniams ir lėktuvams.
7. Atlikus eksperimentinių skrydžių tikslumo matavimus matoma, kad pilotų skrydžio tikslumo vertinamas gali būti atliekamas pagal skirtingų parametrų trajektorijas. Be to, yra užtikrinamas skrydžio vertinimo objektyvumas, kai taikomi tų pačių parametrų vertinimo tuneliai.
8. Tiriant lėktuvų pilotų skrydžio tikslumo vertinimo tunelius ir realių skrydžių duomenis, vietos nustatymo matavimo įranga užtikrina ne didesnę, negu ± 5 m nuokrypį nuo tikrosios orlaivio padėties.

Literatūra ir šaltiniai

Alter, K. W. 2001. *Using wide area differential GPS to improve total system error for precision flight operations*. Dissertation. ISBN 9780493085333.

Amalberti, R. 1992. *Modèles d'activité en conduite de processus rapides: implications pour l'assistance à la conduite*. Doctoral thesis, University of Paris, France.

Amaldi, P.; Fields, B.; Rozzi, S.; Woodward, P.; Wong, W. 2005. Operational concept report. Vol. 1: Approach control; Vol. 2: Tower control (No. OCR2-AD4-WP2-MU), *Interaction design center*, Middlesex University, London, UK, 2005.

AMCOM (United States Army Aviation and Missile Command). 2000. *Aeronautical Design Standard Performance Specification Handling Qualities Requirements For Military Rotorcraft (ADS-33E-PRF)*. Huntsville, Alabama.

Anderson, R. O. 1970. *A new approach to the specification and evaluation of flying qualities*. AFFDLTR-69-120.

Anderson, R. O.; Connors, A. J.; Dillow, J. D. 1970. *Paper pilot ponders pitch*. AFFDL-TR-69-120.

Balfe, N.; Wilson, J. R.; Sharples, S.; Clarke, T. 2012. Development of design principles for automated systems in transport control, *Ergonomics*, 55(1): 37–54.

Beringer, D. B. 2000. Development of Highway-in-the-sky Displays for Flight Path Guidance: History, Performance Results, Guidelines, *Proceedings 43rd Annual Meeting of the Human Factors and Ergonomics Society*, Santa Monica, CA. 2000, 44(13): 21–24.

- Berry, D. T.; Powers, B. G.; Szalai K. J., et al. 1982. In-flight evaluation of control system pure time delays, *Journal of Aircraft*, 19(4): 318–323.
- Billings, C. E. 1991. *Human-centered aircraft automation: a concept and guidelines: NASA-TM-103885*. Moffet Field, California.
- Blackwood, M. I. 2005. *Aeroplane flight simulator evaluation handbook*, 3th edition. London: Royal Aeronautical Society, 2005.
- Blakelock, J. H. 1991. Automatic control of aircrafts and missiles, 2nd ed, Jonh Wiley and Sons publishing, New York, ISBN 0-471-50651-6.
- Borchers, P. F.; Franklin, J. A.; Fletcher, J. W. 1998. Flight research at Ames, 1940–1997: Fifty-seven years of development and validation of aeronautical technology (NASA SP-3300) Moffett Field, CA: NASA, Ames Research Center.
- Bruna, O.; Paces, P. 2012. The most often aircraft accidents – model situations, *CTU* in Prague.
- Bulajeva, T. 2007. *Žinių ir kompetencijų vertinimas: kaip sukurti studentų pasiekimų vertinimo metodiką*. Metodinė priemonė. Vilnius: Petro ofsetas.
- CAA. 2006. *Skrydžio egzamino normatyvai. Orlaivių įgulų licencijavimo taisyklių 3 priedas*.
- CAI (Civilinė aviacijos inspekcija). 2004. Radijo ryšio vadovas.
- Cai, G. 2011. *Unmanned rotorcraft systems*. Springer. ISBN 978-0-85729-634-4.
- Cai, Z.; Huang, D.; Fu, S. 2014. Empirical study of pilot time delay in flight control systems and its safety margin, *Control Conference (CCC), 2014 33rd Chinese*, IEEE, 6346–6351.
- Chao, W. X. 2010. Study on instrument flight procedures noise prediction based on 4D trajectory operation simulation, *International Conference on Computer Application and System Modeling 2010 (ICCA SM 2010)*. ISBN 978-1-4244-7237-6.
- Childs, J. M.; Spears, W. D. 1986. Flight-skill decay and recurrent training, *Perceptual and Motor Skills*, 62(1): 235–242.
- Chin, E.; Nathan, F.; Pauzie, A.; Manzano, J.; Nodari, E.; Cherri, C.; Rambaldini, A.; Toffetti, A.; Marchitto, M. 2006. Subjective assessment methods for workload. Information society technologies (IST) programme.
- Chriukin, A.; Lavrinavičius, M. 1996. *Studentų parengimo lėktuvo JAK-40 treniruoklių programa*. Vilnius: Technika.
- Church, P. 2013. Helicopter precision approaches using GNSS, *Presentation for IET EC section*.
- Collinson, R. P. G. 2011. *Introduction to avionics systems*. 3th edition. Springer. ISBN 978-94-007-0707-8.
- Cummings, M. L.; Myers, K.; Scott, S. D. 2006. Modified Cooper Harper evaluation tool for Unmanned Vehicle Displays, *Proceedings of UVS Canada: Conference on Unmanned Vehicle Systems Canada*, November 8–10, 2006, Montebello, PQ, Canada.

Delahaye, D.; Puechmorel, S.; Tsiotras, P.; Feron, E. 2013. Mathematical models for aircraft trajectory design: a survey, *EIWAC 2013*, 3rd *ENRI International Workshop on ATM/CNS*, Feb 2013, Tokyo, Japan. Springer, 205–247. ISBN 978-4-431-54474-6 (Print) 978-4-431-54475-3 (Online), 290 (Part V).

Glugi, O.; Astheimer, T.; Baldoni, C. 2007. SESAR D3 ATM target concept, *EUROCONTROL*.

Dolega, B; Rogalski, T. 2008. The training rate of aircraft handling quality evaluation scale, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology: An International Journal*, 80(3): 274–279. ISSN 1748-8842.

Du, L. H. 2009. Reduce Errors is the Foundation of Safety: Human Factors and Safety Operation, *Civil Aviation Resource Net of China*.

Durso, F. T.; Sethumadhavan, A. 2008. Situation awareness: Understanding dynamic environments, *Human Factors*, 50: 442–448.

Durso, F. T.; Feigh, K.; Fischer, U.; Morrow, D.; Mosier, K.; Pop, V. L.; Sullivan, K.; Bloesch, J.; Wilson, J. 2011. *Automation in the cockpit: toward a human-automation relationship taxonomy (HART-16)*. Washington, DC.

Ebbatson, M. 2009. *The loss of manual flying skills in pilots of highly automated airliners (PhD thesis)*. Cranfield: Cranfield University.

Eddie, C. L.; Baci, G. 2012. *Introduction to wireless localization with iPhone SDK examples*. 1st edition. IEEE. Wiley. ISBN 978-1-118-29851-0.

Endsley, M. R.; Kiris, E. O. 1995. The out-of-the-loop performance problem and level of control in automation, *Human Factors*, 37(2): 381–394.

Endsley, M. R. 1999. Level of automation effects on performance, situation awareness and workload in a dynamic control task, *Ergonomics*, 42(3): 462–492.

Eurocontrol. 1998. Eurocontrol standard document for area navigation equipment operational requirements and functional requirements, *European air traffic control harmonisation and integration programme*.

European aviation safety agency (EASA). 2013. *Annual safety review 2012*, Cologne.

European aviation safety agency (EASA). 2016. *Annual safety review 2016*.

FAA. 2002. *United States standard for Required Navigation Performance (RNP) instrument approach procedure construction*.

FAA. 2004. *Airplane flying handbook*.

Fitts, P. M. 1954. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement, *Journal of Experimental Psychology: General*, 1992, 121(3): 262–269.

Foyle, D. C.; Hooey, B. L. 2010. *Human performance modeling in aviation*. CRC Press.

Garmin. 2011. *G1000 integrated flight deck pilot's guide. Cessna Nav III*.

Gibson, J. J. 1966. *The senses considered as systems*. Boston, MA: Houghton Mifflin, 1966.

- Gillen, M. 2008. *Degradation of piloting skills (Master Thesis)*. University of North Dakota, Grand Forks.
- Gong, C.; McNally, D. 2004. A Methodology for Automated Trajectory Prediction Analysis, *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, Providence, RI, August 2004, AIAA 2004-4788.
- Gruszecki, J.; Zajdel, Z.; Rzucidło, P. 2007. Informatics tools using estimation during pilot training, *Aviation*, 11(4): 29–35. ISSN 1648-7788.
- Guiry, J. J.; Karr, C. J.; Ven, P.; Nelson, J.; Begale, M. 2014. A single vs multi-sensor approach to enhanced detection of smartphone placement, *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2014 36th Annual International Conference of the IEEE*. ISBN 978-1-4244-7929-0.
- Harper, R. P.; Cooper, G. E. 1986. Handling qualities and pilot evaluation, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 9(5): 515–529.
- Haslbeck, A. A.; Kirchner, P.; Schubert, E.; Bengler, K. 2014. A flight simulator study to evaluate manual flying skills of airline pilots, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 58th Annual Meeting* – 2014.
- Herndon, A. A.; Cramer, M.; Sprong, K. 2008. Analysis of advanced flight management systems (FMS), flight management computer (FMC) field observations trials, radius-to-fix path terminators, *Digital Avionics Systems Conference (DASC). IEEE/AIAA 27th*. ISBN 978-1-4244-2208-1.
- Hess, R. A.; Marchesi, F. 2009. Analytical assessment of flight simulator fidelity using pilot models, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 32(3): 760–770.
- Huang, S. 2010. A metaevaluation study of high schools teacher evaluation pilot systems in Taiwan, *International Conference on Educational and Information Technology (ICEIT 2010)*. ISBN 978-1-4244-8033-3.
- Huang, X.; Wang, J. 2010. Flight operation-oriented tunnel-in-the-sky design, *Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), 2010 IEEE International Conference on*, 813–817. ISBN 978-1-4244-8503-1/10.
- Hess, R. A. 2012. Modeling the pilot detection of time-varying aircraft dynamics. *Journal of aircraft*, 49(6): 2100–2104.
- Hrastovec, M.; Solina, F. 2014. Machine learning model for aircraft performances, *Doctoral symposium ICRAT 2014*.
- ICAO. 2001. *Air traffic management. Procedures for air navigation services*. Doc 4444. 14th edition.
- ICAO. 2006. *Procedures for air navigation services – Aircraft operations*. Vol. 2. 5th edition.
- ICAO. 2009a. *Annex 4. Aeronautical charts*. 11th edition.
- ICAO. 2009b. *Required navigation performance authorization required (RNP AR) procedure design manual*. 1st edition.
- ICAO. 2015. *Safety report*, 2015 edition.

- Yi, Q. 2007. Concepts of US new-generation ATM system, *China civil aviation*, 80(8): 27–31.
- Jalovecky, R.; Janu, P. 2009. Analysis of the characteristics of a pilot in the aircraft flight, *Science & Military journal*, 4(2): 38 p.
- JAR (Joint Aviation Requirements). 1996. All weather operations, *Joint Aviation Authorities*, GILC, Warszawa, 1996.
- JAR (Joint Aviation Requirements). 2002. Flight crew licensing, *Joint Aviation Authorities*, GILC, Warszawa, 2002.
- JAR (Joint Aviation Requirements). 2006. Flight crew licensing, *Joint Aviation Authorities*, 2006.
- Johnson, W. W.; Phatak, A. V. 1990. Modelling the pilot in visually controlled flight, *IEEE Control Systems Magazine*, 10(5): 24–26, ISSN 0272-1708.
- Johnson, N. E.; Pritchett, A. R. 2002. Generic pilot and flight control model for use in simulation studies, *AIAA Modelling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*. USA.
- Kaya, F.A.; Saritaş, M. 2005. A computer simulation of dilution of precision in the global positioning in the global positioning system using Matlab, *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical and Electronic Engineering*, Bursa, Turkey, Vol. 711.
- Kaygusuz, Y.; Cakir, M. P. 2015. A dynamic field theory based pilot model to control aircraft pitch attitudes, *EAPCogSci 2015 (Proceedings of the EuroAsianPacific Joint conference on Cognitive Science)*, Vol. 1419. ISSN 1613-0073.
- Kieras, D. 2009. Model-based evaluation, *Jacko, J.; Sears, A. The Human-Computer Interaction Handbook*, 2nd edition. ISBN 978-1-4200-8889-2.
- Kleinman, D. L.; Baron, S.; Levison, W. H. 1971. A control theoretic approach to manned-vehicle systems analysis, *IEEE Transactions on automatic control*, 16(6): 824–832. Print ISSN 0018-9286. Online ISSN 1558-2523.
- Kondroška, V. 2012. *Regioninių oro erdvės blokų formavimo remiantis skrydžių srautais metodikos kūrimas*. Disertacija, ISBN 978-609-457-339-2.
- Kraeger, A. M.; Veld, A. C. 2007. Flight dynamics and simulation – Part I exercises AE3-303P. With an introduction into the use of Matlab/Simulink.
- Lacabanne, M.; Amadiou, F.; Tricot, A.; Spanghero-Gaillard, N. 2012. *Analysis of the flight task around different types of aircraft*.
- Lange, M.; Hjalmarsson, J.; Cooper, M.; Ynnerman, A. 2003. 3D vizualization and 3D and voice intercation in air traffic management, *The annual SIGRAD conference*. Umea, Sweden, 2003.
- Lim, J.; Lee, S.; Tewolde, G.; Kwon, J. 2014. Ultrasonic-sensor deployment strategies and use of smartphone sensors for mobile robot navigation in indoor environment, *IEEE International Conference on Electro/Information Technology*, 593–598. ISSN 2154-0373.

- Lipovac, V.; Sertic, D.; Milkovic, M. 1999. Some signal propagation and traffic handover aspects of a mobile radio network for high-speed railways, *Promet – Traffic – Traffico*, 11(5): 269–278.
- Loeches F., H.; Fernandez, L.; Sarrazin J. C.; Berton, E.; Rao, G. 2013. Influence of Task Constraints and Device Properties on Motor Patterns in a Realistic Control Situation, *Journal of Motor Behavior*, 45(6): 519–533.
- Long, D.; Lee, D.; Johnson, J.; Kostiuik, P. 2001. A small aircraft transportation system (SATS) demand model. NASA/CR-2001-210874.
- McRuer, D. T.; Jex, H. R. 1967. A review of quasilinear pilot models, *IEEE Transactions in Human Factors in Electronics*, Vol. 8.
- McConnell, P. A. 2011. Circuit training at Moorabbin airport. A report to the Minister for infrastructure and transport, the Hon Anthony Albanese MP.
- Narasimhan, L. 2014. Generalised Bezier curve Matlab code [Interaktyvus, žiūrėta 2016-05-17], *Mathworks*. Prieiga per internetą: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/33828-generalised-bezier-curve-matlab-code>.
- Nieuwenhuizen, F. M.; Zaal, P. M.; Mulder, M.; Paassen, V.; Mulder, J. A. 2008. Modeling human multichannel perception and control using linear time-invariant models, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 31(4): 999–1013.
- Ober, P. B.; Theunissen, E.; Meijer, R. C.; Willigen, D. 1998. RNP requirements for 4-D navigation. *Proceedings of the ION-GPS98 Conference*, Nashville, Tennessee, USA, 15–18 September 1998.
- Oster, C. V.; Strong, J. S.; Zorn, C. K. 2010. Why airplanes crash: causes of accidents Worldwide, *Transportation Research Forum in its series 51st Annual Transportation Research Forum*, Arlington, Virginia, March 11–13.
- Paces, P.; Hruska, M.; Bruna, O. 2013a. A methodic for objective evaluation of flight quality and pilot's ability to recognize emergency situations, *A certified methodic under certification process*, CTU in Prague, FEE.
- Paces, P.; Hruska, M.; Bruna, O. 2013b. A tool for objective evaluation of pilots ability to determine dangerous flight situations, *32nd digital avionics systems conference (DASC)*. ISBN 978-1-4799-1538-5.
- Parasuraman, R.; Riley, V. 1997. Humans and automation: use, misuse, disuse, abuse, *Human Factors*, 39(2): 230–253.
- Peters, M.; Konyak, M. A. 2012. The engineering analysis and design of the aircraft dynamics model for the FAA target generation facility, *Federal Aviation Authority*.
- Phatak, A. V.; Karmali, M. S.; Hartzell, E. J. 1982. Development of a pilot model for helicopter visual flight task segments, *AIAA proc. flight testing to identify pilot workload and pilot dynamics*, M. Frazier and R. B. Crombie, Eds., Edwards Air Force Base, CA, AFFTC-TR-82-5.
- Roscoe, A. H.; Ellis, G. A. 1990. A subjective rating scale for assessing pilot workload in flight: a decade of practical use. RAE Technical Report TR90019.

- Rozzi, S.; Boccalatte, A.; Amaldi, P.; Fields, B.; Loomes, M.; Wong, W. 2007. D.1.1: Innovation and consolidation report. Technical report, *Eurocontrol*, June 2007.
- Rubinstein, R. Y.; Kroese, D. P. 2011. Simulation and the Monte Carlo method. Vol. 707. John Wiley & Sons.
- Savičienė, L. 2009. Žmogaus ir kompiuterio sąsajos projektavimas skrydžio valdymo sprendimų priėmimo sistemai, *Informacijos mokslai*, 50: 181–186. ISSN 1392-0561.
- Savičienė, L. 2011. Operationalization of norms in the SKY-scanner decision support system for aircraft approach and departure, *Informacijos mokslai*, 56: 128–137. ISSN 1392-0561.
- Savičienė, L. 2012. Modeling and visualization of norm violation in decision support for aircraft approach/departure. Doctoral dissertation. Vilnius: 2012.
- Schvaneveldt, R. W.; Beringer, D. B.; Lamonica, J. A. 2001. Priority and organization of information accessed by pilots in various phases of flight, *International Journal of Aviation Psychology*, 11(3): 253–280.
- Shahzad, M.; Mora-Camino, F.; Slama, J. G.; Achaibou, K. 2000. Trajectory generation and display for free flight, *ICAS 2000, 22nd Congress of International Council of the Aeronautical Sciences*, Harrogate, UK.
- Shawlee, W. 2008. RNP: The world of Required Navigation Performance, *Avionics News*, January.
- Shub, Y.; Kushnir, A.; Frenkel, J. 1994. Pilot evaluation system, *Aerospace and Electronics Conference, 1994. NAECON 1994, Proceedings of the IEEE 1994 National*, Vol. 2: 734–741. ISBN 0-7803-1893-5.
- Slattery, R.; Zhao, Y. 1997. Trajectory synthesis for air traffic automation, *Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 20(2): 232–238.
- Strunk, E. A.; Knight, J. C. 2006. Digital avionics: a computing perspective, *IEEE*.
- Swenson, H.; Barhydt, R.; Landis, M. 2006. Next generation air transportation system (NGATS) air traffic management (ATM), *Airspace project, reference material*, NASA.
- Švedaitė, E. 2012. Natūralaus vartotojo potyrio įtakos priklausomybė nuo informacijos pasiskirstymo dėsnų, *Sistemų inžinerija, kompiuterių technologija 2012, 15-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 35–38. ISSN 2029-2341.
- Tang, X.; Han, Y. 2012. 4D trajectory estimation for air traffic control automation system based on hybrid system theory, *Promet – Traffic & Transportation*, 24(2): 91–98.
- Tenney, Y. J.; Rogers, W. H.; Pew, R. W. 1998. Pilot opinions on cockpit automation issues, *International Journal of Aviation Psychology*, 8(2): 103–120.
- Thöndel, E. 2011. Design and optimal control of a linear electromechanical actuator for motion platforms with six degrees of freedom, *Intelligent automation and system engineering*, Springer, 65–77. ISBN 978-1-4614-0373-9.

Thöndel, E. 2012. Design and optimisation of a motion cueing algorithm for a truck simulator, *In proceeding of the 2012 European simulation and modelling conference*, Essen, Germany, 165–170.

Yang, C. P.; Yin, T. W.; Fu, S. 2014. Human factors quantification via boundary identification of flight performance margin, *Chinese Journal of Aeronautics*, 27(4): 977–985.

Yang, J.; Munguia-Tapia, E.; Gibbs, S. 2013. Efficient in-pocket detection with mobile phones, *Proceedings of the 2013 ACM conference on Pervasive and ubiquitous computing*, 31–34. ISBN 978-1-4503-2215-7.

Veillette, P. R. 1995. Differences in aircrew manual skills in automated and conventional flight decks, *Transportation Research Record*, (1480): 43–50. ISSN 0361-1981.

Waegeli, A. 2003. The EGNOS integrity concept: evaluation of the ionospheric corrections, *Proceedings of the 16th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS/GNSS 2003)*, Portland, OR, September 2003, 1449–1454.

Warren, A. 2000. Trajectory prediction concepts for next generation air traffic management, *3rd USA/Europe air traffic management R&R seminar*, Napoli, 2000.

Wickens, C. D. 2002. Situation awareness and workload in aviation, *Psychological Science*, 11(4): 128–133.

Wickens, C. D. 2005. Attentional Tunneling and Task Management. Technical Report AHFD-05-23/NASA-05-10. Savoy, IL: University of Illinois, Aviation Human Factors Division Institute of Aviation.

Williams, D. M.; Consiglio, M. C.; Murdoch, J. L.; Adams, C. H. 2005. Flight technical error analysis of the SATS higher volume operations simulation and flight experiments, *24th digital avionics systems conference (DASC)*, Vol. 2: 12 p. ISBN 0-7803-9307-4.

Wu, K.; Pan, W. 2007. 4D trajectory prediction model based on data mining, *Computer applications*, 27(11): 2637–2639.

Žilienė, D. 2008. *Aviation English for Pilots and Air Traffic Controllers*. ISBN 9789955289098.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Masiulionis, T.; Stankūnas, J. 2017. Review of equipment of flight analysis and development of interactive aeronautical chart using Google Earth's software, *Transport*. Vilnius: Technika, 1–9. <http://dx.doi.org/10.3846/16484142.2017.1312521>. ISSN 1648-4142 (Online). [Published online], (Thomson Reuters duomenų bazėje „Web of Science“).

Masiulionis, T. 2016. Automatic assessment methods of pilot's flight in the traffic circuit, *Aviation*, 20(2): 53–59. ISSN 1648-7788. Web of Science.

Masiulionis, T.; Stankūnas, J. 2013. Methodological aspects of automatic pilot flight assessment system, *Aviation*, 17(3): 113–118. ISSN 1648-7788 print / ISSN 1822-4180 online.

Straipsniai kituose leidiniuose

Masiulionis, T.; Stankūnas, J. 2014. Išmaniojo telefono panaudojimo automatizuotos piloto skrydžio vertinimo sistemos kūrimui metodologinių aspektų tyrimas, *Aviacijos technologijos 2014, 17-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 22–33. ISSN 2029-9974.

Masiulionis, T.; Stankūnas, J. 2012. Stačiakampių plokštuminių koordinatų pasukimas automatinio skrydžio vertinimo sistemoje, *Aviacijos technologijos 2012, 15-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 1–6. ISSN 2029-7149.

Masiulionis, T.; Stankūnas, J. 2012. Programinė įranga ir metodika palydovinei navigacijos sistemai taikyti bei mokomųjų skrydžių tikslumui vertinti, *Aviacijos technologijos 2012, 15-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 1–4. ISSN 2029-7149.

Masiulionis, T.; Jakučionis, A. 2011. Palydovinių navigacijos ir jos papildančių sistemos įrangos panaudojimo mokomiesiems skrydžiams tyrimas, *Aviacijos technologijos 2011, 14-tosios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ medžiaga*. Vilnius: Technika, 57–60. ISSN 2029-9974.

Summary in English

Introduction

Formulation of the problem

With the number of flights increasing globally, it has become necessary to increase the air space capacity. To reach a higher capacity in the airspace, airways in Europe and the United States are becoming more narrow. So, in order to retain the flight safety level, higher flight accuracy requirements have been implemented for the navigational equipment on-board aircraft. Current aircraft systems have reached a high level of flight reliability, which is much greater than pilot abilities. Human error has been found to be a factor in the majority of aircraft incidents and accidents. The rapid development in systems has created a disbalance in adequate pilot training. Therefore, research into aviation specialists training has shifted its focus to aircraft-human interface and the human factor. In order to prepare the best quality aviation specialists, it is crucial to develop new flight accuracy assessment methodologies and automatic means of assessment, which would help to reach and objectively validate the high quality level attained by the pilots. However, at the moment there are no means available which would be applicable to all flight phases and which, according to pre-set flight parameters, would be able to accurately show inadmissible and dangerous flight deviations. These functions are carried out by the automated assessment system of aircraft piloting based on flight tunnels developed by the author.

Relevance of the thesis

Flight safety is one of the most important goals of the air transport system. The main factor for ensuring flight safety is the human factor. One of the most important indicators of pilot qualification is the ability to accurately operate in the air space. In order to record flight trajectory, assess its compatibility with a set route and to provide the assessment results for a flight analysis, it is crucial to develop the methodology for automatic flight assessment and visualization, which would objectively show the operational, orientation, and aircraft and airway map usage skills of the aircraft pilot. Automatic pilot flight assessment tunnels, developed and validated by real flights, allow to assess pilot flight deviations from a set flight trajectory accurately and objectively. The developed methodology and means will simplify and alleviate the job of flight instructors.

The object of the research

The object of the research – the development of methodology and means for automatic flight accuracy assessment of a training aircraft, based on the computerised processing and visualisation of the GNSS receiver flight data.

The aim of the thesis

To develop a methodology for flight accuracy assessment, which, used together with technical means and the algorithms developed by the author, would allow to set up aircraft flight assessment tunnels and evaluate pilot flight accuracy in all phases of flight.

The objectives of the thesis

To attain the research aim, the following objectives that must be carried out are:

1. To analyse the current scientific developments in the field of flight accuracy assessment.
2. To determine measurable and verifiable assessment criteria needed to attain the research aim.
3. To develop the methodology for an automated aircraft piloting assessment system.
4. To verify the theoretically developed methodological assumptions by carrying out experimental flights.

The research methodology

To attain the research objectives the following methods are used:

- Mathematical modelling of flight tunnels, using Matlab software.
- Recording of flight parameters, using GNSS receiver, and visualization of flight tunnels applied to a real flight trajectory as well as graphic representation of deviations.
- Experimental analysis of the developed methodology for an automated aircraft piloting assessment system.

Scientific novelty of the thesis

- A new and innovative methodology for automated assessment of training flight piloting accuracy based on flight tunnel modelling and contemporary software and navigation means has been developed.
- The methodology allows to automatically set up flight assessment tunnels and to assess the accuracy of pilot flight trajectory in all training flight phases with precision as well as to analyse the deviations from a pre-set flight trajectory, by using computerized visualization means for real flight trajectories.

Practical value of the research findings

The developed automated assessment system of aircraft piloting, based on a digital form, allows visualizing and assessing aircraft deviations from a pre-set flight trajectory, and evaluating the pilot flight accuracy objectively and according to uniform criteria. The system simplifies the work of a pilot-instructor, helps to improve both training and the flying skills of the assessed pilot. It is crucial not only to training flights, but also for the improvement of flight safety. A further development of this methodology is especially topical because of increasing intensiveness of air transport and the implementation of new requirements on flight accuracy in light of such projects as Single European Sky and other global programmes related to air transport traffic density management.

Defended statements

1. A mathematical model based on flight tunnel configuration modelling and the assessment of deviations from a pre-set trajectory of the tunnel axis is considered to be the best option for the development of the flight accuracy assessment methodology.
2. The mathematical model of a tunnel must consist of elements modelling separate parts of the flight trajectory with the possibility to change tunnel dimensions and pre-set flight trajectory parameters depending on the difficulty level of the task given to the pilot.
3. To implement the methodology and improve assessment visualization, flight data information needs to be transformed from the geographical WGS-84 coordinate system, used in aviation, to a local ENU coordinate system.

Approval of the research findings

Seven scientific articles on the topic of the dissertation have been published: one – in a research journal, included into Thomson ISI list (Masiulionis 2017); three – in research journals, one – in peer reviewed conference proceedings (Masiulionis, Stankūnas 2013), two – in other international and national conference proceedings (Masiulionis, Stankūnas 2015; 2016).

The results of the research carried out for the dissertation were presented in six scientific conferences in Lithuania and abroad:

- International conference “*Research and Education in Aircraft Design*“, 2014. Vilnius;
- International conference “*Research and Education in Aircraft Design*“, 2016. Warsaw;
- International conference “*Aviation*“, 2013. Vilnius;
- National conference “*Aviation*“, 2015. Vilnius;
- National conference “*Aviation*“, 2016. Vilnius;
- National conference “*Science – Future of Lithuania*” topic section “*Aviation Technologies*“, 2014. Vilnius.

The structure of the thesis

The dissertation consists of an introduction, three chapters and general conclusions, and includes eight annexes.

The scope of the dissertation is 157 pages (annexes not included); in the text 19 numbered formulas, 102 figures and 7 tables are used. In the dissertation 122 references to other sources were used.

1. Analysis of pilot flight assessment methods and requirements

In the first chapter, research articles and scientific sources dealing with topical air transportation issues related to the dissertation topic are reviewed. To manage increasing air space flow, advanced navigation systems are being developed and airspace density is being increased – aircraft are flying closer to each other. Therefore, the risk of aircraft collisions increases. In order to avoid this, pilots should be prepared in advance, since they are the weakest link of the air transportation system, and are responsible for most aircraft incidents and accidents. In order to determine pilot and aircraft capabilities and limitations, models allowing the analysis of their environments, functions and situations are developed. Similar situations and scenarios are used in flight simulators in order to prepare pilots for real flights better.

During the flight, the main aims of the pilot are to operate the aircraft, navigate visually and according to instruments, communicate with the co-pilot and air traffic controllers, and monitor parameters (e. g., fuel level, oil pressure, engine temperature).

The issues arising from these tasks are tackled by research on multitasking and pilot-aircraft interface. Modern research on piloting skills relies on methods of encephalography, analysing pilot brain activity, responding to external stimuli (e. g., sounds). Also pilot hand movements are analysed using 3D optical cameras, which determine hand movements based on sensors placed on them. The chapter also describes methods of data collection and factors influencing their errors that may affect piloting assessment results. Assessment scales that assess aircraft control characteristics, and the achieved piloting level of pilots are described and analysed. To achieve an automatic assessment system capable of determining the level of piloting skills, model based assessment is crucial.

2. Methodology for developing the assessment models of aircraft flight trajectories

In this chapter, the developed means for piloting assessment and flight tunnel based assessment models are described, using Google Earth and Matlab software, allowing the instructor to assess the accuracy of pilot flight trajectory objectively. The designed flight assessment tunnel models cover all main flight tasks: airplane traffic circuit flight, route flight and holding pattern elements, as well as a helicopter slalom flight. The contents of this chapter have been published by the author in journals of Transport and Aviation (Masiulionis 2016).

After analyzing various flight data processing software programmes, it is clear that most of them could help the instructor to accurately assess pilot flights to some extent. Flight data obtained and calculated via a GNSS receiver (such as flight trajectory, altitude, speed, distance and course) can be used; however, without significant reference data, the instructor finds it difficult to assess a pilot's flight.

In routes, pilots usually fly according to aeronautical charts with marked waypoints. Such charts are usually provided either in a digital format or printed. In order to compare a flight trajectory against such a chart, OziExplorer software can be used, providing the possibility to calibrate a digital map into a geographical coordinate grid. However, the use of such means is highly limited by the low resolution of a digital chart. In order to carry out a more detailed route or traffic circuit flight analysis, the resolution of provided charts is insufficient.

Instead of this, Google Earth, a well-known software, which uses high resolution satellite images and global maps has been chosen, mainly because it allows the user to create individual layers, where the necessary flight assessment elements can be marked. An interactive aeronautical chart based on official Air navigation service (ANS) and separate aerodrome documents was designed in this software, with the possibility to change the chart's scale, turn on/off separate layers, thus permitting the visual imaging of only data necessary for flight assessment rather than unnecessary information. The chart includes: Flight information regions – FIRs, Control zones – CTRs, airport Terminal maneuvering areas – TMAs, marked radionavigation beacon positions and their range. Google Earth also supports 3D flight visualization and guide functions, permitting to visualize important flight elements more clearly. However, there are also

downsides. After a renewal of the aeronautical chart by the ANS, the Google Earth chart also needs to be re-checked and renewed to include the amendments. This software package does not allow developing automatic methods, therefore in the next stage of design the Google Earth aeronautical chart is used while developing automated pilot flight assessment methods in Matlab environment.

Automated pilot flight assessment needs to be based on flight assessment tunnel models, where clear limits for the flight trajectory accuracy, permitted horizontal and vertical speeds, altitudes as well as yaw and bank angles are set. On the basis of real pilot flights, flight assessment tunnel models of all main flight tasks with three levels of assessment, according to which pilots could be assessed with the marks 10, 9 and 8, have been designed. If a pilot deviates from all three levels of the tunnel, a negative assessment (fail) is given.

The design of a traffic circuit assessment model is presented. The first and main task for pilots is the traffic circuit flight, during which pilots successively carry out all flight phases: taxi, take-off, climb, level flight, descent, approach, and landing. According to the previously described concept of flight tunnel based assessment, the image of a universal traffic circuit assessment model which can be used for flight assessment at any aerodrome has been created. In its programming code, initial runway (RW) and other flight parameters are set: runway length, width, direction and length of upwind leg and final leg, flight assessment traffic circuit width (initial width which also defines the radiuses of all turns, and secondary width which determines the main flight assessment traffic circuit width). The three parameters define the widths of all traffic circuit assessment tunnels.

An operating traffic circuit assessment model is visualized in Cartesian coordinates. So aircraft flight trajectories are transformed from World geodetic system 1994 (WGS-84) to a local East north up (ENU) coordinate system, in order to carry out coordinate calculations while designing assessment tunnels more easily. Runway center point is chosen as the ENU coordinate reference point, around which, at a certain angle of runway centerline, the traffic circuit assessment model is rotated. Equation system (S2.1) is used for the rotation of coordinates:

$$\begin{cases} x_{rot} = x_c + \cos(\alpha) \cdot (x - x_c) - \sin(\alpha) \cdot (y - y_c); \\ y_{rot} = y_c + \sin(\alpha) \cdot (x - x_c) + \cos(\alpha) \cdot (y - y_c), \end{cases} \quad (S2.1)$$

here x_{rot} , y_{rot} indicate the rotated point coordinates; x_c , y_c – center point coordinates, around which all other points are rotated; x , y – rotated point initial coordinates; α – turn angle in radians.

Equation system (S2.2) is used for drawing traffic circuit turn arcs. The arcs must also be drawn at a certain angle, to coincide with the runway centerline, using equation system (S2.2).

$$\begin{cases} x = r \cdot \cos(\alpha) + x_c; \\ y = r \cdot \sin(\alpha) + y_c, \end{cases} \quad (S2.2)$$

here x , y are the arc point coordinates; x_c , y_c – arc center coordinates; r – arc radius; α – arc angle in radians.

Finally, a fully functioning aerodrome traffic circuit flight assessment model is obtained, which, after defining the required parameters, can be adjusted to suit any aerodrome in the world.

The design of holding pattern assessment models follows similar principles. To model holding patterns two flight task assessment models have been designed: circle flight and figure eight pattern flight.

For the design of a holding pattern assessment model 7 parameters are needed: holding pattern centre coordinates (x_c , y_c), radius of an ideal trajectory circle, three tunnel widths and the title of a holding pattern. To design a circle flight pattern, equation system (S2.2) is also used, except instead of a fixed 90° angle, a 360° angle is used to obtain all circle tunnels. The same assessment model of a holding pattern may be used for a helicopter flight pirouette task assessment.

In Masiulionis (2013), another pilot flight assessment model is proposed, where a figure eight pattern task between two defined reference objects is carried out. To design an assessment model for such a task, 9 parameters for a figure eight pattern must be set: first and second object x and y axis coordinates, three assessment tunnel widths, arc radius and layering parameter (on/off). The layering is designed to include flight tasks between more than two reference objects. A figure eight pattern in Matlab with all possible trajectories between four reference objects using trajectory layering was designed. Other figure eight combinations are also possible, e. g., joined in a row. Then the pilot could fly by constantly going into and out of figure eight patterns.

In addition, the programming code also includes inserted model parameter monitoring, which does not allow entering incorrect parameters, so that the circles would not cross and all lines would join arcs smoothly, e. g., if a figure eight pattern arc radius becomes half of the distance between the objects. The smooth change between circle and straight tunnel in the figure eight pattern allows accurately assessing the accuracy of piloting skills.

The design of route flight assessment model is slightly different. When pilots are already skilled to perform flights in the aerodrome area, they are permitted to fly en-route according to an agreed flight plan with defined and pre-set waypoints. Pilots can design various flight trajectory configurations; therefore, it is necessary to use automatic flight trajectory assessment and design methodology, which would allow assessing pilot flights accurately, and independently of their chosen route. Also, as well as for the traffic circuit, three level assessment tunnels are used. The more pilots deviate from a set trajectory, the higher the expenditure on fuel. Therefore, it is also important to calculate the distance of the set trajectory and measure the distance of the covered trajectory. Since flight coordinates are transformed into Cartesian coordinates, the Euclidean distance calculating equation can be used (S2.3):

$$D = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}, \quad (\text{S2.3})$$

here D indicates distance; x_1 , y_1 – first waypoint coordinates; x_2 , y_2 – second waypoint coordinates.

Distance calculations according to geographic flight coordinates using Matlab distance function or using equation (S2.4) can also be made:

$$d(A, B) = 2r \cdot \arcsin \sqrt{\sin^2 \left(\frac{\varphi_1 - \varphi_2}{2} \right) + \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \sin^2 \left(\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{2} \right)}, \quad (S2.4)$$

here d indicates flight distance; r – Earth's radius; φ_1, φ_2 – A and B point latitude coordinates; λ_1, λ_2 – A and B point longitude coordinates.

En-route turn angles are calculated using trigonometric functions and the coordinates of three waypoints. The difference from the traffic circuit model is the fact that en-route the tunnels are designed according to changing flight trajectory turn angles. Turn angles are calculated using Matlab function (S2.5):

$$\alpha = \text{atan2d} \left(\text{abs}(\det([WP_1 - WP_2; WP_3 - WP_2])), \text{dot}(WP_1 - WP_2, WP_3 - WP_2) \right), \quad (S2.5)$$

here α indicates the turn angle between three waypoints, in angles; WP_1, WP_2 and WP_3 – waypoint coordinates, defined by (x, y) ; atan2d – Matlab four quadrant arctangent function, expressing the result in degrees; abs – Matlab function, expressing coordinate points in absolute numbers; \det – Matlab function, calculating determinant; dot – Matlab function, calculating dot product.

For the design of the en-route assessment tunnel both lines and Bezier curves for the turn arcs are used. In order to design them, the coordinates of the the waypoint and turn start and end point are required. Turn start and end coordinates define the turn sharpness, which is defined by ICAO as the distance to anticipation (DTA). For the calculation of forward and backward directions of turns Matlab functions (S2.6) and (S2.7) are used respectively:

$$kr_t = \text{atan2d}(y_2 - y_1, x_2 - x_1), \quad (S2.6)$$

$$kr_a = \text{atan2d}(y_1 - y_2, x_1 - x_2), \quad (S2.7)$$

here kr_t, kr_a indicate forward and backward directions, expressed in degrees; atan2d – Matlab four quadrant arctangent function, expressed in degrees; x_1, y_1 and x_2, y_2 – first and second waypoint coordinates.

For the design of turns, it is necessary to determine, which way the tunnel turn is carried out (left or right) according to that appropriate turn coordinates must be chosen from the calculated coordinate matrix. Turn direction is determined according to three waypoints and with the use of Matlab functions (S2.8) and (S2.9):

$$kr = \text{cross}([x_2 - x_1, y_2 - y_1, 0], [x_3 - x_1, y_3 - y_1, 0]), \quad (S2.8)$$

$$kryptis = \text{sign}(kr(3)), \quad (S2.9)$$

here cross indicates Matlab function calculating the vector, composed of the other two vectors; x_1, y_1 – first waypoint coordinate; x_2, y_2 – second waypoint coordinate; x_3, y_3 – third waypoint coordinate; sign – Matlab function, recognizing data matrix third element $kr(3)$ result sign (if $kr > 0$, then direction = +1; if $kr = 0$, then direction = 0; if $kr < 0$, then direction = -1).

Then, according to conditions, the required turn tunnel coordinates are chosen. If turn = +1, then left turn coordinates are chosen; if direction = -1 or 0, then right turn coordinates are chosen. Finally, the whole automatic route assessment tunnel model is visualized.

For the design of the route assessment tunnel, at the beginning of the programme the main parameters of the assessment tunnel are defined: the DTA parameter, the widths of the three levels of the tunnel and the pre-set waypoints of the route are read from the CSV (comma separated values) file, where the information on the flight route is kept (waypoint titles and the latitudes and longitudes of these points). Later the pre-set waypoint coordinate number is determined and the cycles are carried out that number of times, during which the geographical coordinates are transformed into Cartesian coordinates and visualized in a diagram.

The design of a helicopter slalom assessment model was also done. While analyzing helicopter flight according to the ADS-33 helicopter training requirements and monitoring flight data recorded in helicopter flight simulator, it was noticed that the helicopter slalom flight task trajectory is similar to a sinus function. In the helicopter slalom flight task the arcs are calculated automatically and are rotated according to defined coordinates. By changing reference object coordinates, the distance between the objects also changes. When the objects are closer or further, the arc angles joining the lines also change. In order to automate the joining of arcs and lines, in the programming code, a scale of distances and angles has been designed, according to which adequate arc angles are chosen. According to these presumptions a helicopter slalom task trajectory assessment model has been designed based on the following equation (S2.10):

$$y(x) = A \sin \left(\varphi + \frac{2\pi y_0}{T} \right) \pm d \pm x_0, \quad (\text{S2.10})$$

here $y(x)$ is the sinus function; A – sinusoid amplitude; φ – sinusoid initial phase; T – sinusoid period (distance between sinusoid maximums); d – amplitude shift; π – mathematical constant, the ratio of a circle's circumference to its diameter; x_0 – initial tunnel x coordinate; y_0 – initial tunnel y coordinate.

The designed slalom task assessment tunnel allows designing flight assessment models of appropriate dimensions.

3. Application of pilot trajectory assessment model in experimental flights

The results of this chapter have been published in journals *Aviation* (Masiulionis 2016) and *Transport* (Masiulionis 2017). This chapter presents the analysis of the developed pilot flight assessment tunnels and their applications for real experimental flights in order to assess the effectiveness of flight models and their potential for assessing pilot flight accuracy.

Experimental traffic circuit flights were carried out. The experiments performed with the traffic circuit indicate that the developed traffic circuit assessment model allows monitoring in which places the pilot deviates from the set flight trajectory. The assessment levels permit to evaluate the deviations made by the pilots accurately. A visual flight tunnel allows not only assessing the deviations, but also helps the instructor to plan the flight with the pilot and to discuss the reasons for the deviations.

A deviation measurement function was used in the traffic circuit tunnel, which permits to measure the distances from an ideal flight trajectory accurately, even in the cases where the pilot flies outside of the assigned assessment tunnels.

The function measures cross deviations to the closest ideal flight trajectory. While measuring deviations, there are no problems when the plane is flying outside the traffic circuit. However, several issues arise when the airplane is flying in the inner side of the traffic circuit.

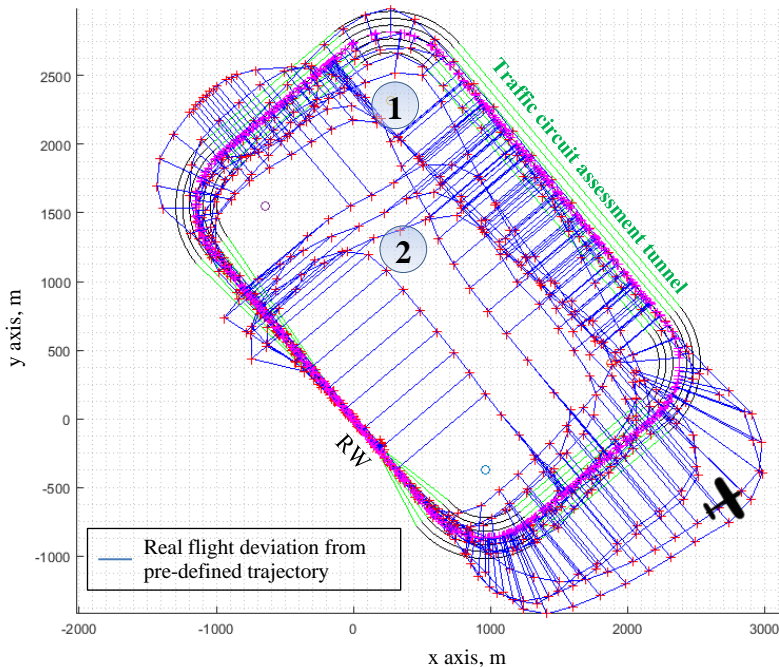


Fig. S3.1. Flight deviation from defined traffic circuit

The first issue occurs when the airplane flies too far from the ideal trajectory during the turns (Fig S3.1, (1)). Then, when measuring deviations, the function picks the closest points on the ideal trajectory on the straight parts of the circuit. This results in deviation leaps in the visualized deviation diagramme, when the chosen points are picked from several straight parts of the traffic circuit.

The second issue arises when the airplane crosses the traffic circuit centerline (Fig. S3.1, (2)). Then flight deviations are measured from the opposite flight leg, e. g., getting further from the final leg leads to deviation measurement from the upwind leg.

In order to avoid these issues, permissible deviations must be set, flying outside of which would result in a negative performance assessment. Using more complex functions, the direction of the traffic circuit could be determined, forbidding the measurement of points until the pilot has successfully covered the required flight leg.

Additionally to the trajectory deviation assessment in the traffic circuit, an analysis of flight distance measurement from the runway center has also been completed. The results of such a distance measurement show that, after completing one traffic circuit,

two distance maximums are reached – one distance maximum is reached on the turn to downwind, and the second one – on the turn to base. Between the maximums mentioned parable curves are obtained. If aircraft flight upwind is shorter than its final, the first maximum is lower than the second. This allows monitoring, how accurately the pilot is able to repeat his flights in the traffic circuit.

An analysis of both horizontal and vertical deviations of experimental flight in the traffic circuit has also been carried out. It is quite difficult to assess, how the pilot maintained the altitude. Therefore, the flight altitudes of all traffic circuits were juxtaposed, so that it would be possible to determine an appropriate altitude assessment tunnel. The Matlab inpolygon function was used, which activates the return of the altitude graph to the beginning, when the airplane flies into the runway area. When juxtaposing altitudes, a few errors of juxtaposition were observed.

The first error depends on the GNSS receiver positioning data transfer frequency. The rarer the GNSS receiver provides positioning fixes, the greater the distance between the recorded airplane positions, resulting in errors when juxtaposing altitudes in the runway area. These errors would be avoided, if the GNSS receiver positioning frequency was higher. The second error occurs when the airplane enters the runway area deviating from the runway centerline or even outside runway boundaries. In these cases the return of the altitude graph is not carried out. In order to avoid this, it is suggested to widen out the trigger zones.

The initial point of a traffic circuit altitude graph can also be determined based on the lowest flight altitude, finding the minimums in the altitude graph. In order to avoid obtaining the minimum for the whole graph, an altitude from which the minimum will be determined needs to be set. The altitude is determined by finding the lowest point of each parable. So, in this way, the lowest position of the airplane in the level of the runway would be found.

In the first case, the beginning of the traffic circuit altitude graph is located according to position, whereas in the second case – according to altitude.

Another group of experimental flights analyzed was holding pattern flights. A holding zone pattern model for experimental flights has been developed, with several levels of assessment. The ideal trajectory has a radius of 500 m, and the widths of assessment tunnels are 400, 600 and 800 m. Real experimental flight trajectories are provided together with the models. Student first solo flight and instructor flights were carried out using a holding pattern assessment model with the same parameters. Pilots flew by compensating drift, with the wind at the time at $200^\circ / 7$ kt. It is evident that the instructor flight is a model flight, which the student should follow in order to obtain a high grade.

The analyzed instructor flight could be used for standard setting, to determine the highest level of performance. The tunnel is made wider, to give more allowance for flight deviations from the set trajectory. In order to calibrate the assessment model appropriately, more detailed analyses of different aircraft types are needed to know, what kind of circles are possible with different aircraft banks and speeds. Then, according to pre-set parameters, it would be possible to accurately assess the pilot ability to follow the trajectory.

The figure eight pattern assessment model designed in Chapter 2 was experimentally tested in Kyviškės airfield with a Cessna 172 airplane. The flight was carried out over the runway (in the 1st holding pattern), and made by an experienced flight instructor of the institute (specialist). In order to repeat the flown figure eight patterns as closely as possible, the pilot maintained a chosen bank angle at turns, and in the straight part flew using a chronometer, present on the aircraft's panel. After the turn he flew for 30 s to the next turn. The wind at the time was $200^{\circ}/7$ kt. The trajectory altitude was maintained within the limits of 50 m.

For the figure eight assessment model, the ideal trajectory radius is 500 m, and the widths of assessment tunnels are – 200, 400 and 600 m. The eight pattern trajectory cross point corresponds to the runway center. The pilot is able to maintain flight trajectory more accurately in the straight part of the figure eight pattern, in comparison with the trajectories in the turns. When assessing real flights the model makes it easier to determine the positions in the trajectory where the pilot made more deviations and how great they were.

Experimental airplane flight en-route were carried out. The route flight is one of the last tasks in which the pilot improves his piloting skills using navigation knowledge. During this task, it is important for the pilot to maintain the flight trajectory defined in the flight plan. Usually pilots try to fly by maintaining waypoints provided in aeronautical charts. In order to adequately assess pilot flight trajectory, it is necessary to follow the flight trajectory waypoints chosen by the pilot or the instructor.

Since pilots can choose various trajectories, an automated route flight assessment tunnel model has been designed, allowing to adequately assess pilot flight deviations from a set flight route trajectory both in the vertical and horizontal planes.

The assessment tunnel turn matches real aircraft flight trajectories. By choosing appropriate DTA distances, the airplane pilot can remain within the set assessment tunnel easily without making any sharp turns. The tunnel can be designed for any route according to pre-set waypoints along the way.

The flight assessment tunnel parameters can be modified by the instructor or according to training requirements; however, for the experimental flight assessment, appropriate waypoints were chosen, and similar parameters for the assessment tunnels were chosen: DTA – 5000 m and widths of assessment tunnels (inner – 500 m, middle – 1500 m and outer – 3000 m). Therefore, all pilots, independently of their chosen route, are assessed according to the same assessment criteria.

As for the traffic circuit, the flight deviation measurement function was used for en-route flights as well, measuring deviations from a set ideal flight trajectory and providing the deviation graph in a separate window.

In the en-route flight tunnel turns, a fly-by technique is used (flying next to a waypoint). This way the pilot should not overfly a waypoint in the turn, but must consistently change the direction from initial course to the following course, when they come close to a waypoint at a defined DTA distance. Such a method is usually used in en-route flights.

While assessing flights, it is necessary to know the reliability of the assessment. If the outer tunnel limit is 3000 m wide, assuming that the GNSS receiver inner positioning error is 10 m, the possibility that the airplane comes outside the limit of the tunnel due to

GNSS receiver error is 0.33 %. Comparing with ICAO RNP requirements that state that an accuracy of 95 % of total flight time is required, with the equipment used for a 3000 m wide tunnel, it is possible to ensure a 99.67 % flight assessment reliability. According to RNAV accuracy requirements in Lithuania, it is necessary to ensure ± 5 NM (± 9260 m) flight accuracy, and according to CAA requirements for private pilots ± 2 km flight accuracy (Annex A).

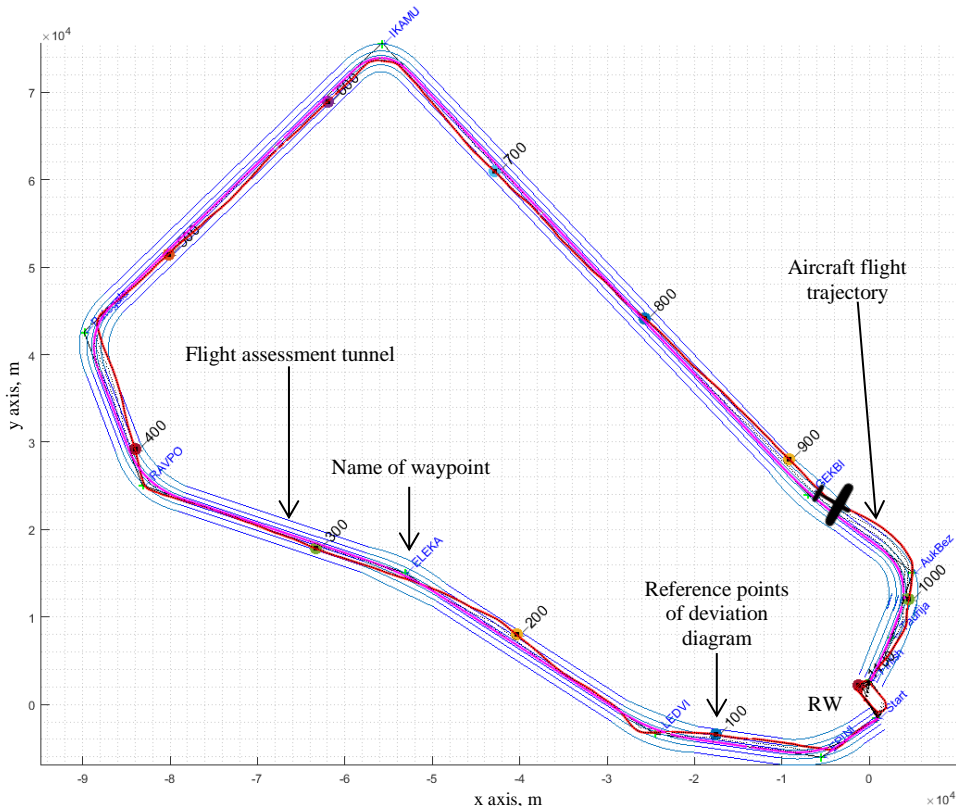


Fig. S3.2. Assessment tunnel of en-route flight

Comparing en-route flight assessment tunnel with a real airplane flight, it is evident that the tunnel allows assessing the deviations adequately. Non-permissible deviations are clearly visible. After deviation outside the permitted limits, pilot flight deviations are accurately visualized in a separate deviation graph.

Altitude monitoring is also important in a route flight. Different flight altitudes can be set between different waypoints; therefore, during the assessment, it is important that the altitudes could be changed automatically. As for the traffic circuit, the inpolygon function can also be used for adequate positioning. After setting trigger zones near the waypoints, it is possible to automatically change altitude parameters after the airplane has flown into them. Also, at that time, the airplane's flight should not be assessed until it is level at the required altitude. Each waypoint should have a specific defined zone,

within which the required flight altitude should be reached. After measuring airplane altitude change distances, the following distances of 2.6, 2.7 and 3.6 km were obtained. As a precaution against assessment errors a bigger diameter trigger zone should be set, to allow time for levelling. The zone diameter with some margin for error should be around 4 km. If the pilot is unable to meet the required level in the required time, this should also be taken into consideration.

While assessing the ability to maintain flight altitude, it was observed that most of the time the pilot is able to maintain the altitude within 50 m accuracy in the assessment tunnel. According to CAA requirements a private pilot is permitted to deviate by ± 30 m (Annex A).

Taking into consideration the measurement equipment errors and LR CAA flight accuracy requirements, with a measuring equipment horizontal position error of ± 5 m, and vertical error of ± 3 m, and with a 10 times bigger margin for inner tunnel parameters, the recommended minimum horizontal inner tunnel width is suggested as 50 m, middle – 150 m, and outer – 250 m; whereas the vertical inner tunnel width is suggested as 30 m, middle – 40 m, and outer – 50 m.

The last type of experimental flights analyzed was helicopter flights in a slalom trajectory. During the internship at France's ONERA (fr. *Office National d'Études et de Recherches Aérospatiales*) aeronautics research laboratory, together with a research supervisor Bruno Berberian, a study based on Fits law was carried out with 4 Brazilian helicopter pilots, using a flight simulator adapted for research, AIRBUS HELICOPTER LC225 with kinematic and aerodynamic models. According to requirements for helicopter pilot slalom flight task (AMCOM 2000), in the flight simulator the area for the task over Lake Etang Du Berre was chosen, because of a smooth surface and no distractions. The pilots had to fly through a number of gates positioned over the lake, the height of which was 150 ft (45.72 m). The pilot had to retain the helicopter altitude between 50 ft (15.24 m) and 100 ft (30.48 m).

Based on ADS-33 requirements, a slalom task with three levels of difficulty was designed, with varying widths of the gates. The standard task gate width completely meets ADS-33 requirements, with a width of 50 ft (15.24 m). Also, in order to compare flights, one more difficult and one easier flight tasks were added, the gate widths of which were 10 and 34.5 m, respectively.

During our research, the pilots carried out test flights, to adjust to the task and its parameters. The experiment starts with an initial speed of 15 kt (28 km/h), set in ADS-33 requirements (AMCOM 2000). Of course, during the task, the pilot could vary the speed as necessary to complete the task.

In a further stage, for data processing, Matlab software was used, which permits visualizing the pilots' trajectory and imitating gates in order to assess the outcome of the task. Each pilot flight trajectory is show for each level: difficult, average (standard ADS-33) and easier. In total, the pilots had to fly through 10 gates; however, results between 1 and 2, and 9 and 10 gates have been eliminated, since these results may be inaccurate, taking into consideration the time needed to stabilize the helicopter for a slalom flight task.

After the experiments, it was noticed that with varying gate width the pilots also vary their flight strategy. At the easiest level, with gates at 34.5 m, a pilot passes the

gates and only then changes the flight course for the upcoming new gates, i.e., flight sinusoid amplitude maximum is reached only after passing the slalom gates. However, with a more difficult task at hand (narrower gates), the pilots starts to adjust the course earlier, in order to have more time and distance to stabilize the helicopters towards the next gates. So, the most difficult level, with gates at 10 m, shows that the flight sinusoid amplitude maximum is reached before flying through the slalom gates.

The slalom flight assessment tunnel maximums designed in Chapter 2 were juxtaposed with real flight gates, but, as mentioned, in a standard slalom task the pilot tries to position for the next gate early, therefore, he constantly deviates from the outer limit of the tunnel. In order for the assessment model to meet the pilot's strategy, the tunnel must be shifted slightly lower. This avoids the alignment of slalom gates with the tunnel amplitude maximums. The shifted slalom tunnel fits the pilot's strategy best in the standard and most difficult tasks, when the slalom tunnel amplitude maximum is shifted 20 m back from the gates. Whereas, wider gates fit the standard task best when gate width is 34.5 m, and the tunnel is shifted 20 m forward from the gate.

It is evident from the results that that the designed slalom task assessment model simplifies the assessment of flight trajectory accuracy. Trajectories that deviate the most are instantly visible outside of the set limits. The pilot's flight is not only assessed at the gates, but also in the whole flight trajectory.

The developed pilot flight assessment model can be widely applied: for pilot training practical flights, or in competitions based on flight accuracy (airplane, helicopter, paragliders and even Unmanned aerial vehicles (UAVs)). Also, the groundwork for further development and improvement of this assessment system and pilot assessment criteria development has been laid.

General conclusions

1. The review of scientific journals and other literature sources related to flight operation and methods for assessing flights revealed that a pilot flight assessment system encompassing all flight phases has not yet been developed. After analyzing the developed smart automatic systems, it is concluded that the existing assessment systems are fragmented, oriented only towards a pre-defined task, and unable to carry out an appropriate and reliable pilot flight assessment in all flight phases.
2. It has been determined that, with the increasing intensity of flights and increasingly stricter requirements on airspace use, appropriate pilot training and assessment that could ensure meeting these requirements and adequate flight safety is crucial. It has been demonstrated that the assessment methodology based on flight tunnel modelling is suited for the assessment of pilot flight deviations from a pre-set flight trajectory.
3. Using modern mathematical modelling software Matlab, a methodology for pilot flight accuracy assessment has been designed, and, using automatic design methods, flight assessment models for all flight phases have been modeled, i.e. for an aerodrome traffic circuit, holding zone, route flight and a helicopter slalom flight.

4. It was determined that for the design of an assessment methodology the following key solutions must be implemented: design of automatic flight tunnels according to pre-set tunnel parameters, aircraft flight trajectory coordinate transformation, flight tunnel coordinate rotation, turn direction detection, and angle and course calculations between waypoints.
5. Using mathematical tunnel design models for real flights, it was determined that the means designed during this research are applicable for automated aircraft piloting accuracy assessment in all flight phases, also the main characteristics of the application of the designed methodology were determined. Flight tunnel based assessment can be used for training as well as in competitions, where aircraft flight accuracy is considered.
6. The pilot flight assessment models proposed in this dissertation are capable of precisely measuring flight deviations from a pre-set flight trajectory (<10 m accuracy). A novel flight accuracy assessment methodology based on tunnels with several assessment levels has been proposed. The flexible assessment models proposed in the dissertation may be applied to all types of trajectories and various types of airplanes and helicopters.
7. During experimental measurements of flight accuracy, it was observed that the flight accuracy of different pilot flights can be assessed independently of the selected flight trajectory, thus, ensuring flight assessment objectivity, when tunnels with the same parameters for assessment are applied.
8. While analyzing airplane pilot flight assessment tunnels and real flights, the measurement equipment ensures that the position measurement errors do not exceed ± 5 m.

Priedai³

A priedas. Piloto skrydžio vertinimo normatyvai

B priedas. Kuperio-Harperio orlaivio valdymo charakteristikų vertinimo skalė

C priedas. Aerodromo rato ir laukimo zonų eksperimentinių skrydžių rezultatai

D priedas. Skrydžio maršrutu eksperimentinių skrydžių rezultatai

E priedas. Palydovinės navigacijos imtuvų vietos nustatymo palyginimas

F priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija

G priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje

H priedas. Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema kopijos

³ Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Tadas MASIULIONIS

AUTOMATIZUOTO ORLAIVIO
PILOTAVIMO VERTINIMO SISTEMA

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
Transporto inžinerija (03T)

AUTOMATED ASSESSMENT SYSTEM
OF AIRCRAFT PILOTING

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Transport Engineering (03T)

2017 05 18. 15,0 sp. l. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“
J. Jasinskio g. 16, 01112 Vilnius